INVESTIGACION y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

MECANISMOS DE FORMACION DE PLASTICOS

REDES DE MEMORIA

¿EXISTE UN ESPACIO-TIEMPO FRACTAL?

COOPERACION EGOISTA DE LOS LEONES



JULIO 1997
800 PTAS.



Julio de 1997 Número 250

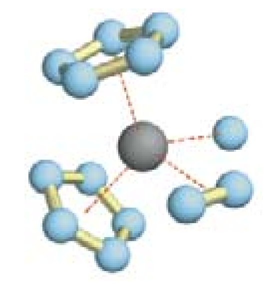
4



El clima que viene
Thomas R. Karl, Neville Nicholls y Jonathan Gregory

Los climatólogos han llegado a la conclusión de que, en virtud del efecto de invernadero y otros factores, la temperatura media global subirá algunos grados el siglo que viene. Sin embargo, las predicciones simplistas que hablan de abrasadores veranos, más huracanes y lluvias torrenciales podrían andar muy erradas. Los autores del artículo ofrecen una visión más realista.

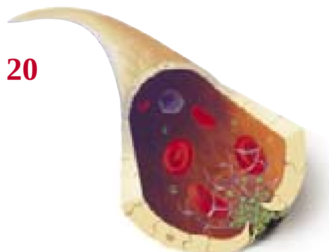
12



Nuevas herramientas químicas para crear plásticos
John A. Ewen

Para manufacturar o inventar nuevos plásticos, los químicos industriales han estado a merced de las herramientas químicas disponibles. Recientemente, un nuevo tipo de catalizadores, denominados metalocenos, han venido a su rescate. Dichas máquinas moleculares permiten un control más efectivo del crecimiento de las cadenas poliméricas.

20



Integrinas y salud
Alan F. Horwitz

Las integrinas son moléculas de adhesión que mantienen “pegadas” las células a su sitio. Para sorpresa de los investigadores, cumplen una misión fundamental en la regulación de la mayoría de las funciones del cuerpo. El autor revela el papel de las integrinas en la artritis, cardiopatías, accidentes cerebrovasculares, osteoporosis y en la propagación del cáncer.

42



La cooperación en los leones
Craig Packer y Anne E. Pusey

El león, el noble rey de las bestias, tiene un lado oculto. Estos felinos se asocian, efectivamente, para cazar presas grandes, criar a sus cachorros y ahuyentar a los rivales. Pero detrás de la cooperación se esconde un astuto programa de intereses egoístas: sólo actúan de forma conjunta cuando esperan obtener un beneficio individual.

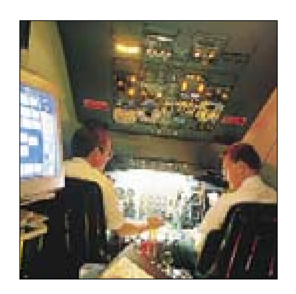
52



Las galaxias del universo joven
F. Duccio Macchetto y Mark Dickinson

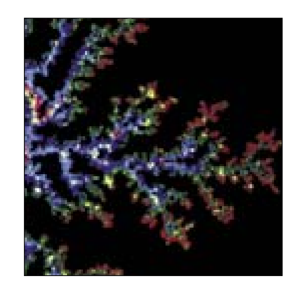
Viaje hacia atrás en el tiempo unos miles de millones de años por cortesía de los telescopios más potentes, y el universo le parecerá un lugar muy diferente. En algún tiempo fue muy caliente, denso y uniforme; hoy hace frío y está en buena medida vacío. El estudio de las galaxias más antiguas y distantes nos está enseñando cómo tuvo lugar esa transformación.

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

60 

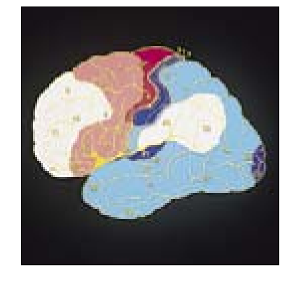
El factor humano en los accidentes aéreos
Robert L. Helmreich

Los errores cometidos por las tripulaciones de vuelo contribuyen a más del 70 por ciento de los accidentes aéreos. En los momentos de crisis aguda, la tensión acumulada por los pilotos puede inducirles a tomar decisiones erróneas con desenlaces fatales. Para afrontar tales situaciones de emergencia, se ha ideado un tipo de adiestramiento llamado gestión de recursos en cabina.

66 

El espacio-tiempo fractal
Laurent Nottale

Se contrapone hoy la física clásica, que se ocupa de los fenómenos a gran escala, a la cuántica, que trata de los microscópicos. El objeto de la teoría de la relatividad de escala es poner fin a este antagonismo, deduciendo la mecánica cuántica de una extensión del principio de la relatividad que gobierna la física clásica. Esta manera de proceder cambia profundamente el marco de nuestro pensamiento.

74 

Redes de memoria
Joaquín M. Fuster

Tras años de exhaustiva exploración, la ciencia creía haber encontrado la sede de cada memoria en el cerebro. Todo indica, sin embargo, que las distintas clases de memoria están tejidas por redes de neuronas que conectan muchos lugares entre sí. Nota característica del sistema nervioso es su capacidad de almacenar información sobre uno mismo y sobre el propio entorno.

SECCIONES

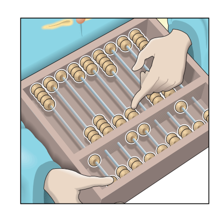
3 **HACE...**

30 **PERFILES**

32 

CIENCIA Y SOCIEDAD

Dimorfismo sexual.

87 

JUEGOS MATEMÁTICOS

Caza mayor en territorio primo.

40 **DE CERCA**

84 **TALLER Y LABORATORIO**

90 **LIBROS**

96 **IDEAS APLICADAS**



Portada: Carl Brenders

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4	Cameron Davidson
6-7	Jennifer C. Christiansen (*gráficas*); Warren Marr (*arriba*); Laurie Grace (*abajo*)
8-9	Warren Faidley
12-13	BioGrafx
14	Fina Oil and Chemical Company; Dow Chemical Company (*arriba*)
15-17	BioGrafx
20	Margo Lakonishok y Chris Doe, Universidad de Illinois
21	Tomo Narashima
22-23	Jennifer C. Christiansen (*arriba*); cortesía de Joanne Emerman y Mina J. Bisell (*abajo izda.*); Richard O. Hynes y Joy T. Yang (*abajo dcha.*)
24-25	Jennifer C. Christiansen
26-27	Roy McClenaghan (*arriba izda.*); Paul Parker (*arriba dcha.*); Jennifer C. Christiansen (*abajo*)
42-49	Craig Packer
50	Carl Brenders
52-53	NASA, Robert Williams y Equipo de Campo Profundo del Hubble; Bryan Christie (*derecha*)
54	NASA, Robert Williams y Equipo de Campo Profundo del Hubble
55	Cortesía de Mark Dickinson
56	NASA; Observatorio Nacional de Radioastronomía
57	NASA; Alan Dressler; Mark Dickinson; Duccio Macchetto y M. Giavalisco
58	NASA; Rogier Windhorst y Sam Pascarelle (*arriba*); NASA; P. Madau y J. Gitlin (*abajo*)
59	NASA; W. N. Colley y E. Turner; J. A. Tyson
61	J. L. Atlan
62	Eric O'Connell; Johnny Johnson (*gráfica*)
63	Johnny Johnson
64	Eric O'Connell
65	R. F. Smith
67-73	Documents Pour la Science
75-82	Joaquín M. Fuster
84	Patricia J. Wynne
85	Bryan Christie
87-89	Juan Velasco

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Manuel Puigcerver: *El clima que viene*; Javier de Mendoza: *Nuevas herramientas químicas para crear plásticos*; Santiago Torres: *Integrinas y salud*; Joandomènec Ros: *La cooperación de los leones*; Mónica Murphy: *Las galaxias del universo joven*; Miguel Angel Gómez Tierno: *El factor humano en los accidentes aéreos*; Juan Pedro Campos: *El espacio-tiempo fractal*; Ignacio Morgado: *Redes de memoria*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; J. Vilardell: *Hace...*, *Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; John Horgan, *Senior Writer*; Corey S. Powell, *Electronic Features Editor*; W. Wayt Gibbs; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; David A. Schneider; Glenn Zorpette; Marguerite Holloway y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION Richard Sasso
PUBLISHER Joachim P. Rosler
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	11.000	20.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

GASOLINA A CHORROS. «Parece ser que General Motors y Ford han dado carpetazo a sus planes referentes a los vehículos ligeros, considerando "inoportuno" distraer materiales y mano de obra para la fabricación de unos automóviles ligeros que consuman menos litros de gasolina por cada cien kilómetros. Estas medidas dejan a Crostley Motors sola ante la oportunidad de conseguir una posición de cabecera en el mercado de los coches baratos.» [*Nota de la Redacción: Crostley Motors cerró en 1952*.]

ATOMOS METÁLICOS. «Merced a experimentos con metales calientes y fundiciones, la ciencia está desarrollando una teoría: Dada una cantidad de energía y unas condiciones mínimamente propicias, los átomos pueden transitar de un cristal metálico a otro, formando estructuras nuevas. Hace miles de años que se realizan soldaduras en frío, a temperaturas inferiores al punto de fusión, sin que nadie supiera por qué los metales se unían unos a otros. Lo que los átomos parecen necesitar es más tiempo para moverse en vaivén dentro de sus propios cristales y para emigrar de un cristal a otro. Entonces, éstos parecen quedarse trabados mediante los átomos que intercambian, creando así una soldadura auténtica.»

...cien años

BACTERIAS BENÉFICAS. «Tanto se ha dicho de las bacterias como agentes y difusoras de enfermedades, que es difícil conseguir que el público deje de considerar esos minúsculos organismos como portadores de desgracias. Sin embargo, en la naturaleza su papel es benéfico y contribuyen tanto a nuestro bienestar y placer como a nuestro malestar e incomodidad. La razón por la que ciertas clases de quesos y mantequillas saben y huelen mejor es que se desarrollaron comercialmente diferentes especies de bacterias.»

LA CÁMARA MAYOR DEL MUNDO. «Theodore Kytka, artista y experto en microfotografía, ha construido una cámara mastodóntica: La porción telescópica de ésta mide más de siete metros y medio cuando se despliega hasta su máxima capacidad. Esta cámara la ha empleado la policía para resolver el caso de un cheque contra el Banco de Nevada que alguien elevó desde doce hasta veintidós mil dólares. Para ello se colocó el cheque ante la cámara y se fotografió y amplió, resaltando no sólo las fibras del papel sino también las líneas sobre el mismo. La cámara puso pálidamente de manifiesto las letras "doce" que habían sido borradas con ácido por los falsificadores antes de que escribieran "veintidós mil" encima.»

DIAMANTES SINTÉTICOS. «Gracias al éxito del profesor Henri Moissan, los diamantes pueden ya fabricarse en el laboratorio; microscópicos ciertamente, pero con una forma y apariencia cristalinas, color, dureza y efectos sobre la luz iguales a los de las gemas naturales. Envuelto en hierro en un crisol de carbono, introducido dentro de un horno eléctrico y calentado hasta más de 4000º, fue sumergido en agua fría hasta que se enfrió por debajo del calor rojo. La expansión del líquido al solidificarse generó una enorme presión, bajo cuya fuerza el carbono disuelto se separó en forma de diamante.» [*Nota de la Redacción: los experimentos de Moissan se han repetido muchas veces y el único material de dureza cristalina que inequívocamente han producido es espinela*.]



Máscara de terracota cartaginesa

LUDDISMO EN PARÍS. «El doce de julio ardieron los talleres de la Sociedad Constructora de Vehículos Automóviles, sitos en la Rue Pouchet, de París, con la consiguiente destrucción de sesenta vehículos. Se cree que el incendio fue intencionado. Se sabe que los conductores de coches de tiro se oponen a la introducción de vehículos automóviles, de los que piensan que están llamados a robarles su medio de vida.»

MÁSCARA CARTAGINESA. «Un interesantísimo hallazgo en una necrópolis púnica de Cartago es el de una máscara de terracota, que aquí ilustramos. Tiene veinte centímetros de altura y conserva algunas trazas de pintura negra. La boca y los ojos están recortados atravesando el espesor de arcilla y las orejas aparecen adornadas con aros. Sobre el puente de la nariz lleva la marca de su origen púnico en la media luna, de cuernos hacia abajo, que corona el disco, emblema éste muy frecuente en las estelas votivas de Cartago. Tales máscaras acostumbraban depositarse junto a los muertos.»

...ciento cincuenta años

PISCICULTURA EN CHINA. «La cría de peces con calor artificial es una actividad normal en China y la venta de freza para ello constituye una importante actividad comercial en ese país. Los pescadores recogen con cuidado de las superficies de las aguas todas las sustancias gelatinosas que puedan contener freza, que enseguida colocan en una cáscara de huevo, la cual fue vaciada siendo el huevo fresco. Colocan luego la cáscara debajo de un ave incubadora. Al cabo de pocos días los chinos rompen las cáscara dentro de agua templada, donde los pececillos permanecen hasta que se hacen lo bastante grandes para ser introducidos en un estanque.»



El clima que viene



Los archivos meteorológicos y los modelos informáticos permiten esbozar un cuadro verosímil de cuáles serán las características generales del tiempo en un mundo más cálido

Thomas R. Karl, Neville Nicholls y Jonathan Gregory



THOMAS R. KARL, NEVILLE NICHOLLS y JONATHAN GREGORY han pertenecido al Comité Intergubernamental de Cambio Climático, encargado de asesorar y valorar la influencia de las actividades humanas sobre el clima global. Karl trabaja en el Centro Nacional de Datos Climáticos de la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica de los EE.UU. Nicholls desarrolla su labor científica en el Centro de Investigación del Servicio Meteorológico australiano. Gregory, experto en construcción de modelos climáticos, se halla adscrito al Centro Hadley de la Oficina Meteorológica del Reino Unido.

El hombre se sabe ya consciente de que podría haber alcanzado, si bien involuntariamente, una proeza de proporciones descomunales. Por su número y por la técnica desarrollada, la humanidad podría haber inducido la alteración del clima del planeta.

Los climatólogos sostienen, con pocas reservas, que, a lo largo de los últimos cien años, la temperatura media global ha aumentado en aproximadamente medio grado Celsius. Tal calentamiento se atribuye, al menos en parte, a actividades humanas; por ejemplo, la combustión de carburantes fósiles en las centrales térmicas de producción de electricidad y en los automóviles. Puesto que no dejan de crecer la población, las economías nacionales y las aplicaciones de la técnica, se espera, además, que la temperatura media global continúe aumentando en una cuantía adicional de 1 a 3,54 grados Celsius hacia el año 2100.

Tal calentamiento es una de las muchas consecuencias que puede producir el cambio climático. Las diversas formas mediante las cuales el calentamiento podría afectar al ambiente del planeta —y por tanto, en las formas vivas— destacan entre las cuestiones más apremiantes que tienen abiertas las ciencias de la Tierra. Por desgracia se cuentan también entre las más difíciles de predecir. Los efectos derivados de tal calentamiento, amén de complejos, variarán considerablemente de un lugar a otro. Revisten particular interés los cambios operados en el clima regional y el tiempo local; sobre todo, los fenómenos extremos: temperaturas muy altas o muy bajas, olas de calor, lluvias muy fuertes o sequías, episodios que muy bien podrían producir efectos azarosos en las sociedades, agricultura y ecosistemas.

1. ESTA FINCA INUNDADA cerca del río Mississippi en 1996 ilustra una consecuencia verosímil de la tendencia al calentamiento. No sólo aumentará la pluviosidad general; alcanzarán también una intensidad mayor los episodios aislados.

Si nos adentramos en los estudios de la variación del tiempo terrestre en los últimos cien años en función del ascenso paulatino de la temperatura media global, y nos apoyamos en complicados modelos informáticos del clima, extraeremos la conclusión verosímil de que el calentamiento vendrá acompañado de cambios en el tiempo regional. Por ejemplo, unas olas de calor más largas e intensas —probable consecuencia de un aumento de la temperatura media global o de la variabilidad de las temperaturas diarias— comportarían una grave amenaza contra la salud pública (altísimo número de bajas) y provocarían importantes daños materiales (combado de las carreteras) junto con exigencias no menos costosas (aumento de consumo para refrigeración, lo que podría incluso obligar a cortes parciales o totales del suministro eléctrico).

El cambio climático también afectaría a la distribución de lluvias y otras precipitaciones; en unas zonas aumentarían, para disminuir en otras, con la consiguiente alteración de la distribución global y la aparición de sequías e inundaciones. Asimismo, esa mayor variabilidad y ese incremento de los extremos de precipitación pueden exacerbar problemas todavía irresueltos de calidad y depuración del agua, erosión y descarga urbana de precipitaciones breves e intensas, entre otros. Ante tamaña perspectiva, resulta imperioso que se conozcan las consecuencias del efecto de la especie humana sobre el clima global.

Dos puntas

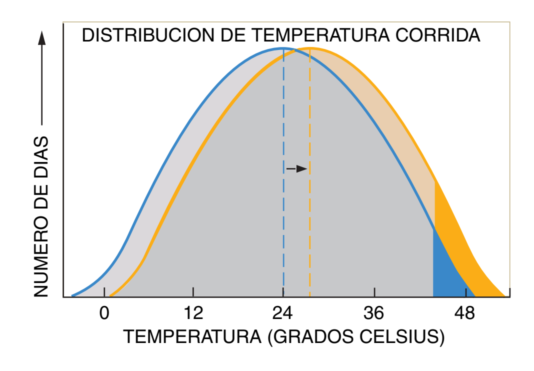
Los estudiosos disponen de dos métodos principales —y complementarios— para investigar los cambios climáticos. El archivo minucioso de los fenómenos meteorológicos cuenta más o menos con un siglo de historia, que coincide con el período durante el cual la temperatura media global aumentó en medio grado. El análisis de tales mediciones y registros permite a los climatólogos comenzar a esbozar un cuadro de los momentos y lugares en que se produjeron los extremos de tiempo y clima.

Pero a los científicos lo que realmente les interesa es la relación entre extremos y aumento general de temperatura. Para lo cual necesitan el concurso de otra herramienta crítica de investigación: los modelos globales oceánicos y atmosféricos del clima. Estos modelos informáticos de altas prestaciones simulan los procesos importantes de la atmósfera y los océanos; en ellos se basan los investigadores para hacerse una idea de las relaciones entre las actividades humanas y los sucesos principales de la temperie y el clima.

Fijémonos, por ejemplo, en los carburantes fósiles. Su combustión aumenta la concentración en la atmósfera de ciertos gases “de invernadero”, los agentes fundamentales del calentamiento global imputables al hombre. Estos gases, entre los que se citan el dióxido de carbono, metano, ozono, halocarburos y óxido nitroso, dejan pasar la luz solar, pero tienden a aislar el planeta contra la pérdida de calor, cual si conformaran el vidrio de un invernadero. A mayor concentración, pues, clima más cálido.

De todos los gases de invernadero producidos por la actividad humana (antropogénicos), el dióxido de carbono es, con diferencia, el que ejerce mayor impacto en el balance global de calor (diferencia entre la cantidad de calor absorbida por el planeta y la devuelta al espacio en forma de radiación). La persistencia de dicho gas refuerza su eficacia aislante: hasta un 40 por ciento de dióxido de carbono tiende a permanecer en la atmósfera durante siglos. La acumulación de dióxido de carbono atmosférico viene favorecida no sólo por la combustión, sino también por la deforestación tropical.

Entre los efectos causados por los humanos en el balance de radiación de la Tierra le siguen en influencia, probablemente, los aerosoles. Estas diminutas partículas sólidas, recubiertas a veces de una película líquida, se hallan dispersas por la atmósfera. Proceden de la combustión, aunque emanan también de fuentes naturales, sobre todo de erupciones volcánicas. Al bloquear o reflejar la luz, los aerosoles mitigan el calentamiento global a escalas globales o regionales. A diferencia del dióxido de carbono, los aerosoles no permanecen mucho en la atmósfera (con un tiempo de





2. PEQUEÑOS CORRIMIENTOS en la temperatura diaria más frecuente originan aumentos desmesurados en el número de días extremadamente cálidos. La razón es que las distribuciones de temperatura se aproximan a curvas de Gauss. Por ello, cuando el punto más alto de la curva de "campana" o gaussiana se corre hacia la derecha (*arriba*), se produce un aumento bastante grande (*región en amarillo*) de la probabilidad de que se excedan umbrales de temperatura extremadamente altos. Una mayor probabilidad de altas temperaturas aumenta la probabilidad de olas de calor (*derecha*).

residencia inferior a una semana); en consecuencia, están concentrados en la vecindad de sus fuentes. Hoy, los expertos abrigan más dudas sobre los efectos radiativos de los aerosoles que sobre los causados por los gases de invernadero.

Al tomar en consideración los aumentos de los gases de invernadero, los modelos climáticos globales del océano y la atmósfera pueden proporcionar ciertas indicaciones generales de lo que podríamos anticipar sobre las variaciones en los episodios meteorológicos y en los extremos. Pero las prestaciones que ofrecen incluso los ordenadores más rápidos y nuestro mediocre conocimiento de las relaciones entre los diversos fenómenos atmosféricos, climáticos, terrestres y oceánicos limitan nuestra capacidad para modelar procesos importantes en las escalas a las que se producen. Atendamos, por ejemplo, a las nubes. Cumplen éstas una función capital en el balance de calor atmosférico. Sin embargo, los procesos físicos que forman las nubes y determinan sus características operan en escalas demasiado pequeñas para poder tenerlas directamente en cuenta en las simulaciones a escala global.

¿Cuán cálido y frecuente?

Las limitaciones de los modelos informáticos aparecen con notoria claridad al pretender recrear y predecir la frecuencia de extremos (cualesquiera que sean) del clima y del tiempo. De estos extremos, se ha estudiado con notable empeño la temperatura, lo que resulta explicable habida cuenta de su incidencia en la salud y la mortalidad, así como en el aumento de consumo para refrigeración y otros factores. Los expertos han podido hacerse una imagen del comportamiento de esos extremos analizando decenios de registros meteorológicos. Por razones estadísticas, basta un ligero incremento de la temperatura media para que aparezcan grandes saltos en el número de días muy cálidos [*véase la figura 2*).

¿Por qué cuesta tanto modelar los extremos de temperatura? Entre otras razones, por su sensibilidad a variaciones esporádicas de la circulación y las masas de aire, que ocasionalmente pueden hacerlas seguir un curso inverso al de la temperatura media. A modo de botón de muestra: en la

3. EL AUMENTO de la temperatura media global se simuló (*arriba, a la izquierda*) mediante un modelo climático en el Centro Hadley de la Oficina Meteorológica del Reino Unido. La línea azul corresponde a una simulación basada exclusivamente en el dióxido de carbono; la línea amarilla tiene también en cuenta el aerosol de sulfato. Conforme crecía la temperatura media global, disminuía el número de días con temperaturas mínimas bajo cero. Este ejemplo (*a la izquierda*) muestra el número anual de días de escarcha en la australiana Roma, Queensland.



antigua Unión Soviética, el mínimo absoluto anual de temperatura ha aumentado en grado y medio, mientras que la máxima absoluta anual no ha experimentado cambio.

El Centro Nacional de Datos Climáticos, integrado en la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica (NOAA) de los EE.UU., ha desarrollado un modelo estadístico que simula las temperaturas máxima y mínima diarias a partir de tres propiedades de la gráfica de temperatura en función del tiempo. Esas tres propiedades son la media, su variancia diaria y su correlación de un día a otro (la correlación refleja la persistencia de las temperaturas: por ejemplo, la frecuencia con que un día cálido sigue a otro día cálido). Dados nuevos valores de media, variancia y persistencia, el modelo pronosticará la duración y rigor de los extremos de temperatura.

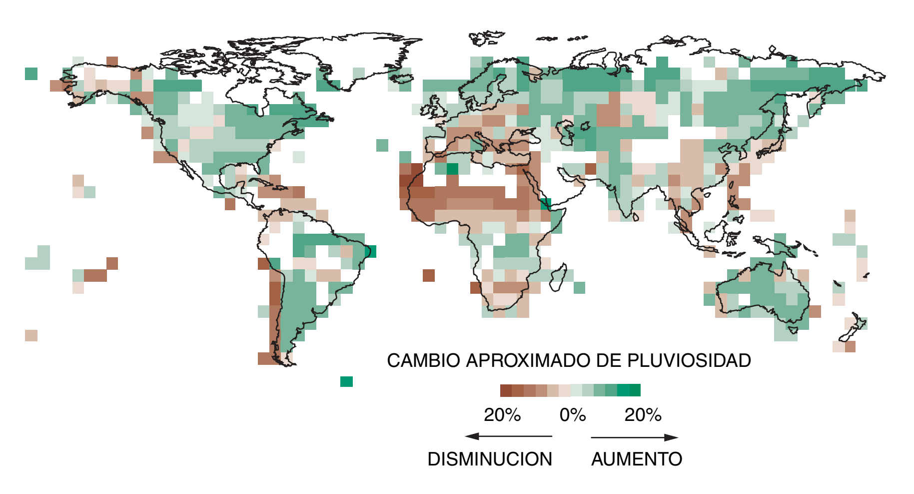
Algunas de sus predicciones son llamativas. Chicago, por destacar una urbe, muestra una variabilidad considerable de una semana a otra. Aun cuando la temperatura media de enero subiera cuatro grados (lo que puede realmente ocurrir a finales del próximo siglo), mientras las otras dos propiedades se mantuvieran constantes, seguiría habiendo días de temperatura mínima inferior a –17,8 grados Celsius. Y así incluso varios días seguidos. Debería también producirse una disminución del número de heladas precoces y tardías, a tenor de la estación. No debería provocar sorpresa que, durante el verano, menudearan más los agobiantes períodos muy cálidos, incluidas olas de calor asfixiantes. Con sólo un incremento de tres grados Celsius en la temperatura media de julio, la probabilidad de que el índice de calor (un valor que comprende la humedad y mide la sensación de incomodidad) exceda 49 grados Celsius alguna vez durante el mes aumenta de uno cada 20 a uno cada cuatro.

Por su incidencia en la agricultura, los aumentos en la temperatura mínima revisten particular interés. De acuerdo con los registros anotados en zonas rurales a lo largo de la segunda mitad de este siglo, la temperatura mínima ha aumentado a un ritmo más del 50 por cien mayor que el seguido por la máxima. Este aumento ha dilatado el período exento de heladas en muchas partes de los EE.UU.; en el nordeste, por ejemplo, el período sin heladas comienza ahora 11 días antes de lo que acontecía en los años cincuenta. Un período exento de heladas más largo puede resultar beneficioso para muchas cosechas cultivadas en lugares donde las heladas no son muy corrientes, pero también afecta el crecimiento y desarrollo de plantas perennes y de plagas.

Se nos escapan las razones por las que las temperaturas mínimas crecen más deprisa que las máximas. Ese fenómeno podría, quizá, guardar relación con la cobertura nubosa y el enfriamiento por evaporación, que han aumentado en muchas regiones. Las nubes tienden a mantener los días más frescos, al reflejar la luz solar, y las noches más cálidas, al bloquear la pérdida de calor del suelo. El incremento de humedad en el suelo gracias a la precipitación y nubosidad adicionales inhibe la subida de temperatura durante el día porque parte de la energía solar se invierte en la evaporación de esta humedad. Para alcanzar una explicación más concluyente, así como poder predecir si continuará la asimetría del calentamiento diurno y nocturno, deberemos esperar la elaboración de mejores modelos informáticos.

Los pronósticos de los cambios de temperatura día a día son menos seguros que los de la media. Con todo, los registros sugieren que, al hacerse el clima más cálido, esta variabilidad ha decrecido en gran parte de las latitudes medias del hemisferio septentrional. La variabilidad, que depende de la estación y la situación, está también relacionada con las características de la superficie, tales como la nieve caída y la humedad del suelo. En las latitudes medias, los cambios de la variabilidad diaria de las temperaturas han venido, asimismo, asociados a cambios de la frecuencia e intensidad de temporales y cambios de la posición de las trayectorias comúnmente seguidas por ellos. Estas trayectorias de los temporales son una sucesión de depresiones de latitudes medias que avanzan hacia el este y cuyo paso determina el tiempo.

La relación entre esos temporales y la temperatura es complicada. En un mundo más caliente, la diferencia de temperatura entre los trópicos y los polos cubriría con toda probabilidad un menor intervalo, por la sencilla razón de que en los polos se espera mayor calentamiento. Este factor ten-



4. EL CURSO de la precipitación entre 1900 y 1994 revela una tendencia general hacia mayor precipitación en las latitudes más altas y menor, en las más bajas. El verde indica más lluvia; el castaño, menos.

dería a debilitar los temporales. Por otra parte, en la alta atmósfera se invertiría la diferencia, lo que influiría de manera opuesta. También se producirían cambios en los temporales si los aerosoles antropogénicos continuasen enfriando regionalmente la superficie, alterando los contrastes horizontales de temperatura que controlan la posición de las trayectorias de los temporales.

5. LOS HURACANES, ciclones tropicales, conocerán a buen seguro distribuciones globales diferentes en virtud del calentamiento; lo que no significa, sin embargo, que su influencia general haya de cambiar. El huracán Andrew, que aparece aquí rugiendo en Miami, afectó a la costa suroriental de los EE.UU. en 1992, causando pérdidas por valor de 30.000 millones de dólares.



Más precipitación

La complejidad aludida en la relación entre temporales y distribución de temperaturas constituye una de las razones por las que resulta tan difícil simular los cambios climáticos. Los componentes principales del clima —temperatura, precipitación y temporales— se hallan en tan intensa interrelación, que es imposible entender uno al margen de los otros. En el sistema climático global, por ejemplo, el ciclo de evaporación y precipitación transporta no sólo agua de un lugar a otro, sino también calor. El calor consumido en el suelo por la evaporación del agua se libera a cierta altura en la atmósfera cuando el agua vuelve a condensarse en forma de nubes y precipitación, calentando el aire circundante. La atmósfera pierde después este calor por radiación hacia el espacio.

Con o sin gases de invernadero adicionales, la Tierra absorbe la misma cantidad de energía solar y radia de nuevo la misma cantidad hacia el espacio. Sin embargo, con una mayor concentración de gases de invernadero, la superficie está mejor aislada y puede radiar menos calor *directamente* desde el suelo hacia el espacio. Decae la eficacia con que el planeta radia calor hacia el espacio, lo que significa que la temperatura debe subir para que se pueda radiar la misma cantidad de calor. Y a medida que la temperatura aumenta, se produce más evaporación, lo que conduce a mayor precipitación global en promedio.

Ahora bien, la precipitación no aumentará en todas partes y a lo largo de todo el año. (Por contra, todas las regiones del globo deberán registrar temperaturas más altas hacia fines del próximo siglo.) La distribución de las precipitaciones viene determinada no sólo por procesos locales, sino también por la velocidad de evaporación y las corrientes atmosféricas que transportan humedad.

Veámoslo aplicado. La mayoría de los modelos predicen una disminución de la precipitación en Europa meridional en verano como resultado del aumento de los gases de invernadero. En esta región, una fracción notable de la lluvia proviene de la evaporación local; el vapor que no precipita localmente se exporta a otras regiones. Por tanto, con un clima más cálido, el aumento de la evaporación en primavera desecaría el suelo y conduciría a una menor disponibilidad de agua para la evaporación y la lluvia en verano.

A mayor escala, los modelos prevén un aumento de la precipitación media en invierno en las latitudes altas. Lo atribuyen al mayor transporte de humedad hacia el polo, instado por el aumento de evaporación en las bajas latitudes. Desde comienzos de siglo, la precipitación ha aumentado en las altas latitudes del hemisferio norte, principalmente en la estación fría, conforme subieron las temperaturas. Pero en las regiones tropicales y subtropicales, la precipitación ha decrecido en los últimos decenios, lo que se ha comprobado de manera patente en el Sahel y, en dirección este, hasta Indonesia.

En la franja más septentrional de Norteamérica (al N de 55 grados) y Eurasia, con temperaturas por debajo de cero durante gran parte del año, las nevadas han aumentado desde hace varios decenios. Es probable que en estas regiones se produzca un ulterior incremento de la precipitación en forma de nevadas. Más hacia el sur, en el S de Canadá y N de los EE.UU., la razón de nieve a lluvia ha disminuido; aunque, en virtud del aumento de precipitación total, ha habido poca variación general en la cantidad de precipitación en forma de nieve. En los cinturones de transición de la nieve, donde las nevadas son intermitentes durante toda la estación fría, la precipitación media en forma de nieve tenderá a disminuir con el calentamiento del clima, antes de anularse por completo en algunos lugares. Importa advertir que, desde 1986, la superficie cubierta por la nieve durante la primavera y el verano ha menguado bruscamente en casi un 10 por ciento. Esta disminución de la cobertura nival ha contribuido a la subida de las temperaturas de primavera en las latitudes medias y altas.

Además de las cantidades totales de precipitación, hemos de tomar en consideración la frecuencia con que se producen copiosos aguaceros o rápidas acumulaciones, de enorme interés en sus secuelas. Las precipitaciones intensas pueden provocar inundaciones, erosionar los suelos y causar bajas humanas. ¿Qué variación se espera de su frecuencia?

La precipitación depende de la humedad relativa, que es, a su vez, la relación entre la concentración de vapor de agua y su máximo valor de saturación. Cuando la humedad relativa alcanza el 100 por ciento, el agua se condensa en forma de nubes y puede arrancar a llover. Los modelos informáticos sugieren



seco en los próximos decenios. Una perspectiva nada halagüeña, si pensamos en la repercusión que un suelo seco tiene sobre las cosechas, recursos freáticos, ecosistemas de ríos y lagos y sobre los mismos cimientos de los edificios. Las altas temperaturas resecan el suelo acelerando las velocidades de evaporación y de transpiración por las plantas. Varios modelos prevén ahora notables incrementos en el rigor de las sequías. Atemperando esas predicciones, sin embargo, hay estudios de la frecuencia e intensidad de las sequías en este siglo que sugieren que, al menos en las primeras fases del calentamiento global, otros factores han predominado sobre los efectos desecadores de una temperie más cálida. Por ejemplo, en los EE.UU. y la antigua URSS, los aumentos de nubosidad durante los últimos decenios han conducido a una disminución de la evaporación. En el occidente ruso la humedad del suelo ha aumentado.

que la distribución de la humedad relativa no se alterará mucho al cambiar el clima.

Sin embargo, la concentración de vapor de agua necesaria para alcanzar la saturación en el aire sube rápidamente con la temperatura, a una razón aproximada de 6 por ciento cada grado Celsius. Así, en un clima más cálido, la frecuencia de la precipitación (que está relacionada con la frecuencia con la que humedad relativa llega al 100 por cien) variará menos que la cantidad de precipitación (relacionada con la cantidad de vapor de agua presente en el aire). Y no sólo un mundo más cálido tendrá mayor precipitación; probablemente, el episodio medio de precipitación tenderá a ser más copioso.

Diversos análisis apoyan la tesis del aumento de la intensidad. En los EE.UU., por ejemplo, un promedio de aproximadamente el 10 % de la precipitación total anual se produce durante fuertes aguaceros en los que al menos caen 50 milímetros en un día. A principios de siglo, esa proporción no llegaba al 8 por ciento.

Por increíble que parezca con toda esta precipitación, es de esperar que en Norteamérica, sur de Europa y otros lugares el suelo se torne más

Tempestades

Por cuantiosos que sean, los costes de las sequías y las olas de calor parecen menos evidentes que los de otra clase de tiempo extremado: los ciclones tropicales. Estos temporales, conocidos como huracanes en el Atlántico y tifones en la parte occidental del Pacífico norte, producen daños ingentes en las regiones costeras y en las islas tropicales. Conforme el clima se vaya haciendo más cálido, se prevén cambios en la actividad de ciclones tropicales que variarían de unas regiones a otras. No todas las consecuencias serían negativas: en algunas regiones bastante áridas, la contribución de los ciclones tropicales a la lluvia resulta vital. En el NW de Australia, por ejemplo, del 20 al 50 por ciento de la lluvia anual está asociada a ciclones tropicales. Pero los daños producidos por un ciclón arrasador pueden ser tremendos. En agosto de 1992, el huracán Andrew mató a 54 personas, dejó sin vivienda a 250.000 y causó daños por valor de 30.000 millones de dólares en el Caribe y en la costa SE de los EE.UU.

En los primeros debates sobre el impacto presumible de una intensificación del efecto de invernadero solía aludirse a ciclones tropicales más frecuentes e intensos. Puesto que estas tempestades dependen de una superficie caliente con provisión ilimitada de humedad, se forman sólo sobre océanos con temperatura superficial de 26 o más grados Celsius. Por tanto, se aseguraba, el calentamiento global conduciría a temperaturas oceánicas más altas y, presumiblemente, a más ciclones tropicales.

Para la investigación actual, fundada en modelos climáticos y registros históricos, semejante cuadro peca de un simplismo excesivo. Otros factores —el empuje arquimediano en la atmósfera, las inestabilidades en las corrientes atmosféricas y las diferencias de la velocidad del viento a diversas alturas (cizalladura vertical del viento)— intervienen también en el desarrollo de esas tempestades. Sin embargo, fuera de proporcionarnos esa visión más general, los modelos climáticos sólo aportan una ayuda limitada en la predicción de los cambios de la actividad ciclónica. Ello se debe, en parte, a que las simulaciones no han adquirido todavía el grado suficiente de detalle para poder modelar el intensísimo núcleo interior de un ciclón.

Algo mayor es el auxilio que presta el archivo histórico, incompleto. Cierto es que ha resultado imposible establecer un registro global fidedigno de la variabilidad de los huracanes tropicales a lo largo del siglo XX, por un doble motivo: los cambios operados en los sistemas de observación (introducción de satélites a finales de los años sesenta) y las variaciones de población en las regiones tropicales.

Contamos, sin embargo, con buenos archivos de la actividad ciclónica en el Atlántico norte, donde los aviones meteorológicos han venido realizando labores de reconocimientos desde los años cuarenta. Christopher W. Landsea, del Laboratorio Oceanográfico y Meteorológico del Atlántico, de la NOAA, infiere de los registros consultados una disminución en la intensidad de los huracanes, así como en su cuantía. Entre 1991 y 1994 se produjo un intervalo de suma tranquilidad por lo que se refiere a la frecuencia de tempestades, huracanes y huracanes intensos; ni siquiera la estación de 1995, de insólita intensidad, pudo invertir esta tendencia declinante. Aunque debemos anotar, por otra

parte, que el número de tifones en el Pacífico NW parece haber subido.

En conjunto, parece improbable que los ciclones tropicales aumenten de forma significativa a escala global. En algunas regiones, la actividad podría intensificarse; en otras, remitir. Cambios todos ellos que acontecerán en un marco de grandes variaciones naturales de un año a otro año y de un decenio al siguiente.

Los ciclones de latitudes medias acompañados de copiosa lluvia, las llamadas tempestades extratropicales, abarcan por lo común una superficie mayor que la de los ciclones tropicales; admiten, pues, una más fácil modelación. Ya se han realizado algunos trabajos. Uno reciente de Ruth Carnell y sus colaboradores del Centro Hadley, de la Oficina Meteorológica del Reino Unido, ha hallado menos tempestades, aunque más intensas, en el Atlántico norte como consecuencia de la acentuación del efecto de invernadero. Pero no todos los modelos concuerdan.

Los análisis de los datos históricos tampoco conducen a una conclusión clara. Algunos estudios sugieren que, desde finales de los años ochenta, la actividad ciclónica de invierno en el Atlántico norte ha sido más extrema de lo que nunca fue durante los cien años que les precedieron. A lo largo de los últimos decenios se ha observado también una tendencia de vientos más fuertes y mayores alturas de olas en la mitad septentrional del Atlántico norte. Otros análisis, realizados por Hans von Storch y sus colaboradores del Instituto Max Planck de Meteorología en Hamburgo, no han hallado prueba de cambios en el número de tempestades en el Mar del Norte. En general, como ocurría con los ciclones tropicales, la información disponible pone de manifiesto que carecemos de base sólida para poder predecir aumentos globales de las depresiones extratropicales, aunque no pueden descartarse las variaciones regionales.

El futuro

Aunque esas clases de huecos denuncian las limitaciones de nuestro conocimiento del sistema climático, de la valoración de las pruebas se infiere que las actividades humanas han ejercido ya una influencia discernible sobre el clima global. En el futuro, para reducir la incertidumbre respecto al cambio climático antropogénico, sobre todo a escalas menores, será necesario mejorar nuestra potencia informática de construcción de modelos, al par que prosiguen las observaciones minuciosas de los factores climáticos.

Serán, asimismo, de ayuda nuevas iniciativas, citemos el Sistema de Observación Climática Global, y la investigación exhaustiva de ciertos procesos climáticos importantes; lo serán también los superordenadores de creciente potencia. No debe olvidarse, sin embargo, la complejidad del sistema climático, razón de que en cualquier momento puedan surgir sorpresas. Las corrientes del Atlántico norte podrían sufrir bruscas modificaciones y producir cambios bastante rápidos del clima en Europa y parte oriental de Norteamérica.

Entre los factores que intervienen en nuestras predicciones del cambio climático antropogénico, y una de nuestras mayores incógnitas, está la cantidad futura de emisiones globales de gases de invernadero, aerosoles y otros agentes de interés. El determinar esas emisiones trasciende la mera labor científica: le importa a toda la humanidad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CHANGING BY DEGREES: STEPS TO REDUCE GREENHOUSE GASES. U.S. Congress, Office of Technology Assessment, 1991.

POLICY IMPLEMENTATION OF GREENHOUSE WARMING: MITIGATION, ADAPTATION AND THE SCIENCE BASE. National Academy of Sciences. National Academy Press, 1992.

GLOBAL WARMING DEBATE. Número especial de *Research and Exploration: A Scholarly Publication of the National Geographic Society*, volumen 9, n.º 2; primavera 1993.

GLOBAL WARMING: THE COMPLETE BRIEFING. John T. Houghton. Lion Press, 1994.

CLIMATE CHANGE 1995: THE SCIENCE OF CLIMATE CHANGE. Contribución del Grupo de Trabajo I al *Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Dirigido por John T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callendar y N. Harris. Cambridge University Press, 1996.

INDICES OF CLIMATE CHANGE FOR THE UNITED STATES. T. R. Karl, R. W. Knight, D. R. Easterling y R. G. Quayle en el *Bulletin of the American Meteorological Society*, volumen 77, n.º 2. págs. 279-292; febrero 1996.

Nuevas herramientas químicas para crear plásticos

Unas pequeñas máquinas moleculares denominadas catalizadores metalocenos han revolucionado la síntesis industrial de valiosos plásticos

John A. Ewen

Los alquimistas de la época medieval trataron de convertir el plomo en oro. Los químicos actuales saben que se trata de una causa perdida, pero muchos de nosotros aún nos ganamos la vida descubriendo cómo convertir materias primas baratas en productos valiosos. El equivalente moderno de la poción mágica de los alquimistas es un catalizador, es decir, una sustancia que inicia una reacción química deseada o que acelera una reacción que de otra forma iría tan lenta, que no tendría interés económico. El impacto social de esta magia de nuestros días no puede ser despreciado.

Los catalizadores han hecho posible —entre otras cosas— el desarrollo de varios plásticos modernos. Los plásticos se sintetizan persuadiendo a pequeñas moléculas orgánicas a que se unan entre sí formando largas cadenas denominadas polímeros. Dichos materiales han encontrado tan vasta aplicación, que es difícil concebir la vida sin ellos. Ligeros, resistentes al agua y a la corrosión, constituyen la primera elección del proyectista, ocúpese de tuberías de agua, bolsas de basura, peines para el pelo, fibras para ropa o para construir carreteras o envases de alimentos o medicamentos. Los millones de toneladas de plásticos vendidos anualmente han hecho de esta industria un sector vital de la economía.

JOHN A. EWEN obtuvo su doctorado en química por la Universidad de Tulane en 1979. De 1980 a 1984 trabajó como químico de catálisis en la Exxon Chemical Company en Baytown, Texas, y un año más tarde se incorporó a Fina Oil and Chemical en Deer Park, Texas, donde investigó sobre producción de polipropileno y en química de catalizadores de zirconio. Desde 1991 Ewen es presidente de la Catalyst Research Corporation en Houston, que asesora a empresas sobre aspectos comerciales de la catálisis.

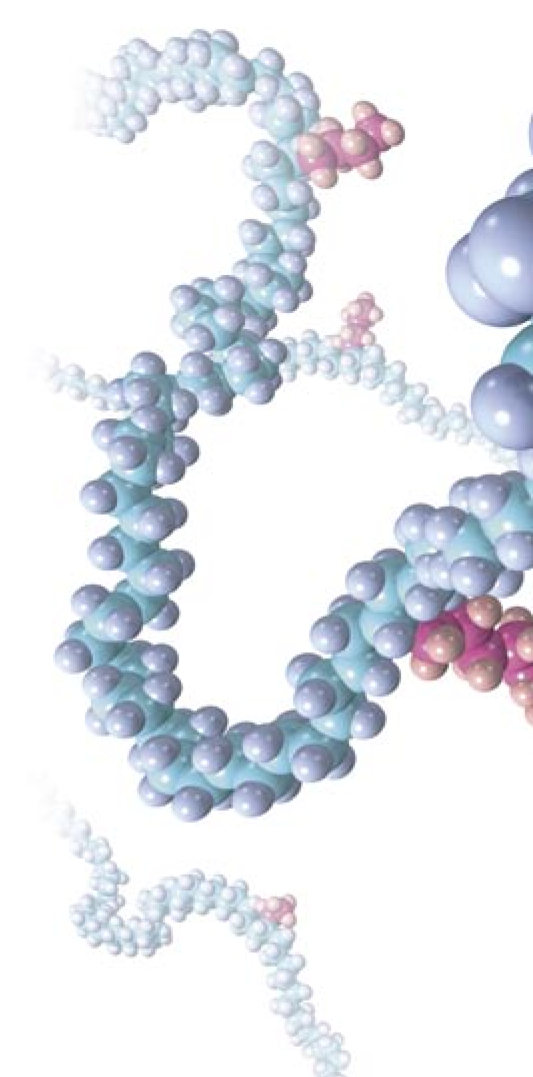
A pesar de su ubicuidad, algunos polímeros sintéticos de importancia se han sintetizado, desde la década de los cincuenta, mediante catalizadores cuyo control sobre la longitud de las cadenas poliméricas, así como sobre otros aspectos estructurales que influyen en las propiedades del material obtenido, resulta ser solamente limitado.

Desde hace un tiempo los químicos han pensado que con catalizadores mejorados, que permitan un mejor control de la polimerización, se podrían crear plásticos con propiedades físicas adaptadas a usos concretos. Por ejemplo, un plástico para una rueda dentada debería ser de gran duración, mientras que el material para tuberías debería ser diseñado para soportar altas temperaturas. Sin embargo, sin una clara comprensión de la catálisis tradicional, los investigadores sólo podrían conseguir leves mejoras mediante el procedimiento de prueba y error.

A lo largo de los últimos veinte años, descubrimientos cruciales han mostrado cómo crear catalizadores que controlen de forma extraordinaria el crecimiento polimérico. La industria de plásticos produce ya centenares de millones de toneladas empleando dichas sustancias, denominadas metalocenos. Los analistas de empresa predicen que, en pocos años, los plásticos sintetizados con metalocenos se encontrarán en casi todos los hogares.

Catalizadores de antaño

Los catalizadores tradicionales tuvieron su origen a mediados de los cincuenta, cuando Karl Ziegler y Giulio Natta inventaron en Europa procesos para polimerizar etileno y



propileno en polietileno y polipropileno. Ziegler y Natta compartieron el premio Nobel de química de 1963 por su trabajo, y dichos simples plásticos constituyen hoy día pilares de esta industria. El etileno y el propileno son pequeñas moléculas de carbono e hidrógeno producidas en grandes cantidades por la industria del petróleo; el etileno tiene dos átomos de carbono y el propileno tres. Ambos poseen un reactivo doble enlace que conecta dos carbonos adyacentes. Los catalizadores de Ziegler-Natta son mezclas de compuestos sólidos y líquidos que contienen átomos metálicos y atacan al doble enlace, transformándolo en un enlace sencillo. Al propio tiempo, permiten a los carbonos afectados unirse a moléculas de etileno o propileno cercanas.

El resultado es un polímero que se alarga rápidamente. El polietileno presenta un esqueleto carbonado en forma de zigzag tachonado de átomos de hidrógeno. El polipropileno se diferencia en que posee grupos, distribuidos regularmente a lo largo del esqueleto, formados por un átomo de carbono y tres de hidrógeno. Es más rígido que el polietileno y sus aplicaciones son más diversas.

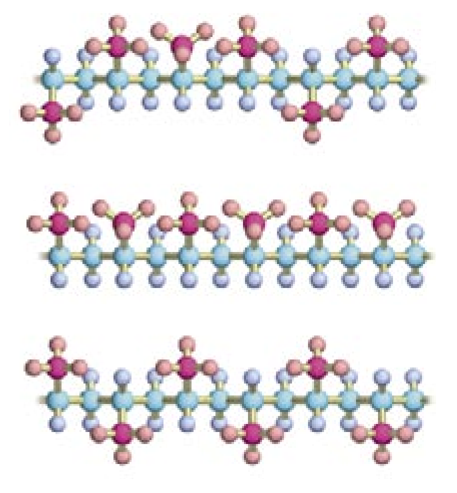
Uno de los estímulos comerciales que propulsaron la mejora de los procesos de fabricación de polietileno nació de la necesidad de controlar mejor las cadenas laterales. El polietileno puro de cadena larga (o lineal) puede tornarse quebradizo. El polímero puede controlar mejor las fuerzas que lo rompen, como las existentes en una bolsa de basura, si las cadenas incluyen de cuando en cuando una corta cadena lateral. Las cadenas laterales favorecen la unión entre sí de los microcristales del plástico. Sin embargo, los catalizadores de Ziegler-Natta tradicionales no resultan eficientes para la incorporación de cadenas laterales en la forma deseada, por lo que los fabricantes que emplean técnica antigua encuentran dificultades para obtener un polietileno resistente al desgarramiento.

En el caso del polipropileno el reto era que, a diferencia del polietileno, el propileno puede agregarse a la cadena en dos orientaciones, que son imágenes especulares. Se puede hacer una comparación con las diversas formas de apilar libros. Podríamos colocar todos los cantos al mismo lado de una montaña de libros, o colocar alternativamente un canto a la izquierda y otro a la derecha. La estabilidad del conjunto sería completamente distinta en cada caso. De la misma forma, las propiedades del polipropileno varían según como estén insertados los monómeros, es decir, las moléculas individuales que forman el polímero. Ello dificulta el empleo de los catalizadores de Ziegler-Natta tradicionales para la fabricación de polipropileno.

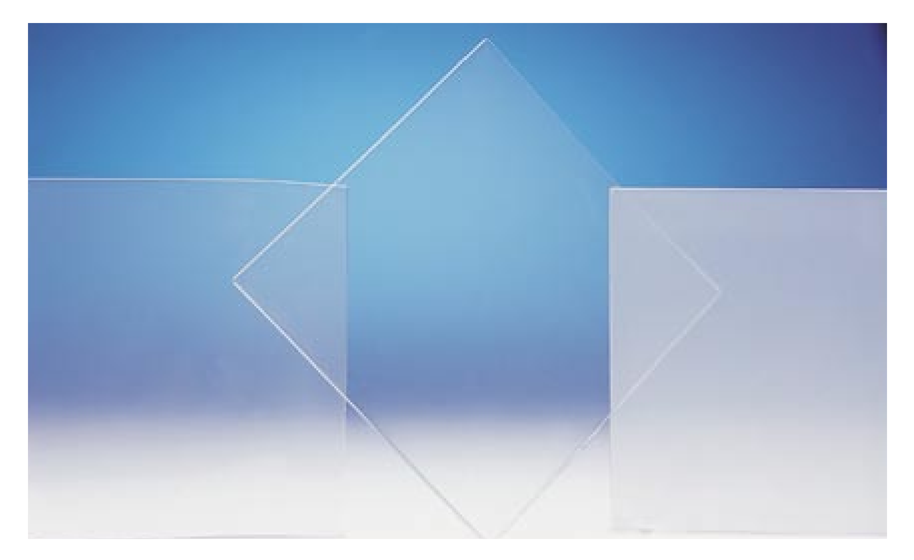
Máquinas moleculares

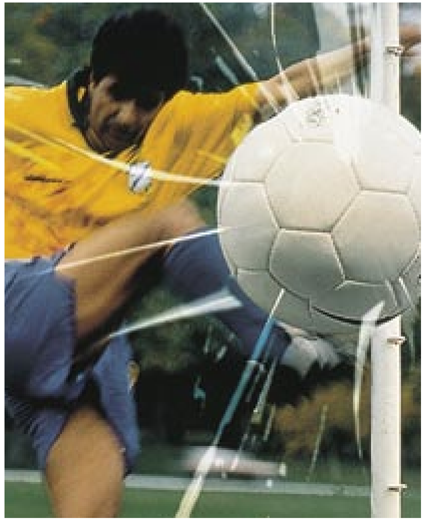
Mi implicación en esta historia se remonta a 1980, cuando fui contratado por Exxon como experto en catálisis para trabajar cerca de Houston en un amplio y ambicioso grupo investigador. Los catalizadores funcionan como máquinas, y resulta esencial comprender cómo operan antes de empezar a pensar en cómo mejorarlos. Dado que la fórmula para hacer catalizadores de Ziegler-Natta

FORMAS DE POLIPROPILENO



1. PLASTICOS MODERNOS CLAVE, que pueden construirse con metalocenos. Comprenden el polietileno (*izquierda*) y el polipropileno (*las tres cadenas de arriba*). La disposición aleatoria de las cadenas laterales carbonadas (*rosa*) conduce a una estructura débil (*arriba*), pero los polipropilenos isotácticos y sindiotácticos (*centro* y *abajo*) son valiosos.





2. EL POLIPROPILENO SINDIOTACTICO (*bloques a la izquierda y el centro de la fotografía izquierda*) **presenta numerosas ventajas con respecto al polipropileno tradicional** (*bloque derecho*)**, como su mayor transparencia. El polietileno** (*fotografía derecha*) **sintetizado con una variante de catalizador metaloceno se obtiene comercialmente; es más resistente al desgarramiento que el polímero preparado con un catalizador al uso.**

se había ido modificando mediante procesos de ensayo y error, nadie sabía en realidad qué tipo de estructuras rodeaban a los átomos metálicos. Sin embargo, la estructura de un catalizador es la que dicta su forma de acción y predetermina, por tanto, las propiedades de los polímeros que fabrica. Por tanto, mi primera tarea fue la de averiguar algo sobre los mecanismos de acción de los catalizadores tradicionales.

Si bien a los químicos les resulta difícil manipular macromoléculas, pueden ejercer un detallado control sobre la síntesis de otras menores. La estructura y simetría presentes en el diseño de cantidades minúsculas de un catalizador se reflejan y multiplican millones de veces en la estructura de los polímeros que produce. Este es en esencia el principio que la naturaleza emplea cuando las enzimas sintetizan las complejas moléculas de los organismos vivos. Mi idea fue construir pequeñas moléculas de catalizadores con estructuras bien definidas y estables, y con un único centro catalítico. Podríamos, en consecuencia, determinar su modo de acción, estudiando los polímeros resultantes.

Sobre mi pensamiento ejercieron gran influencia las teorías de Piet Cossee en torno a los catalizadores de Ziegler-Natta. En los años sesenta, Cossee, del Royal Shell Laboratory de Amsterdam, propuso que un átomo metálico forma temporalmente enlaces de forma simultánea con una cadena polimérica creciente y con el doble enlace del monómero. Dichos enlaces facilitan la atracción eléctrica del extremo de la cadena hacia el monómero. Cossee proponía que el extremo de la cadena migraba y se fusionaba con el monómero. La cadena se hacía así algo más larga, y su anterior posición quedaba vacante. Al repetirse el proceso, la cadena se va extendiendo.

Elegí investigar sobre metalocenos, moléculas sintetizadas por John Birmingham, que trabajaba en el laboratorio del premio Nobel británico Geoffrey Wilkinson. Al igual que los catalizadores de Ziegler-Natta tradicionales, los metalocenos contienen un metal, aunque un átomo sólo, en general titanio o zirconio. El átomo metálico está unido a dos anillos de cinco carbonos, y a otros dos grupos, en general simples carbonos unidos a hidrógenos. Los anillos desempeñan un papel esencial, encerrando parcialmente al metal como si estuviera dentro de una almeja semiabierta. Los electrones de los anillos actúan también sobre el metal, modificando su propensión a atacar dobles enlaces carbono-carbono.

Desde 1957, los químicos sabían, por los trabajos de Natta y de otros, como David Breslow, Wendell P. Long y Norman Newburg, de la Hercules Powder Company, que el metaloceno de titanio catalizaba la polimerización del etileno. Sin embargo, la reacción era tan lenta, que carecía de interés comercial. Pero en 1976 Hansberg Sinn y Walter Kaminsky, de la Universidad de Hamburgo, observaron algo importante: adicionando cantidades controladas de agua, la catálisis por metalocenos transcurría mucho más rápidamente.

Recordé que con anterioridad, en 1967, F. Dyachovskii, A. K. Shilova y A. E. Shilov, de la Academia de Ciencias de la URSS, habían publicado un artículo en inglés en el que suscribían la teoría de los químicos de Hercules según la cual el átomo metálico de un metaloceno lleva una carga positiva y funciona básicamente como el metal de un catalizador de Ziegler-Natta tradicional. Por ello, los resultados de Sinn y Kaminsky me sugirieron que los metalocenos modificados podrían revestir interés comercial.

Una razón adicional para investigar sobre metalocenos era que los dos anillos de cinco átomos de carbono del sistema básico de metaloceno contenían un total de 10 átomos de hidrógeno. Era de esperar que, al reemplazar alguno de dichos hidrógenos por otros átomos o grupos, se modificaran las propiedades del metaloceno. En definitiva, se abría un mundo de posibilidades a explotar, sobre todo porque, sorprendentemente, dichas modificaciones nunca se habían abordado de forma sistemática.

De la teoría a la práctica

Confirmamos pronto que cantidades del orden del miligramo de un metaloceno de zirconio en un reactor de alta presión proporcionaban cientos de gramos de plástico en una

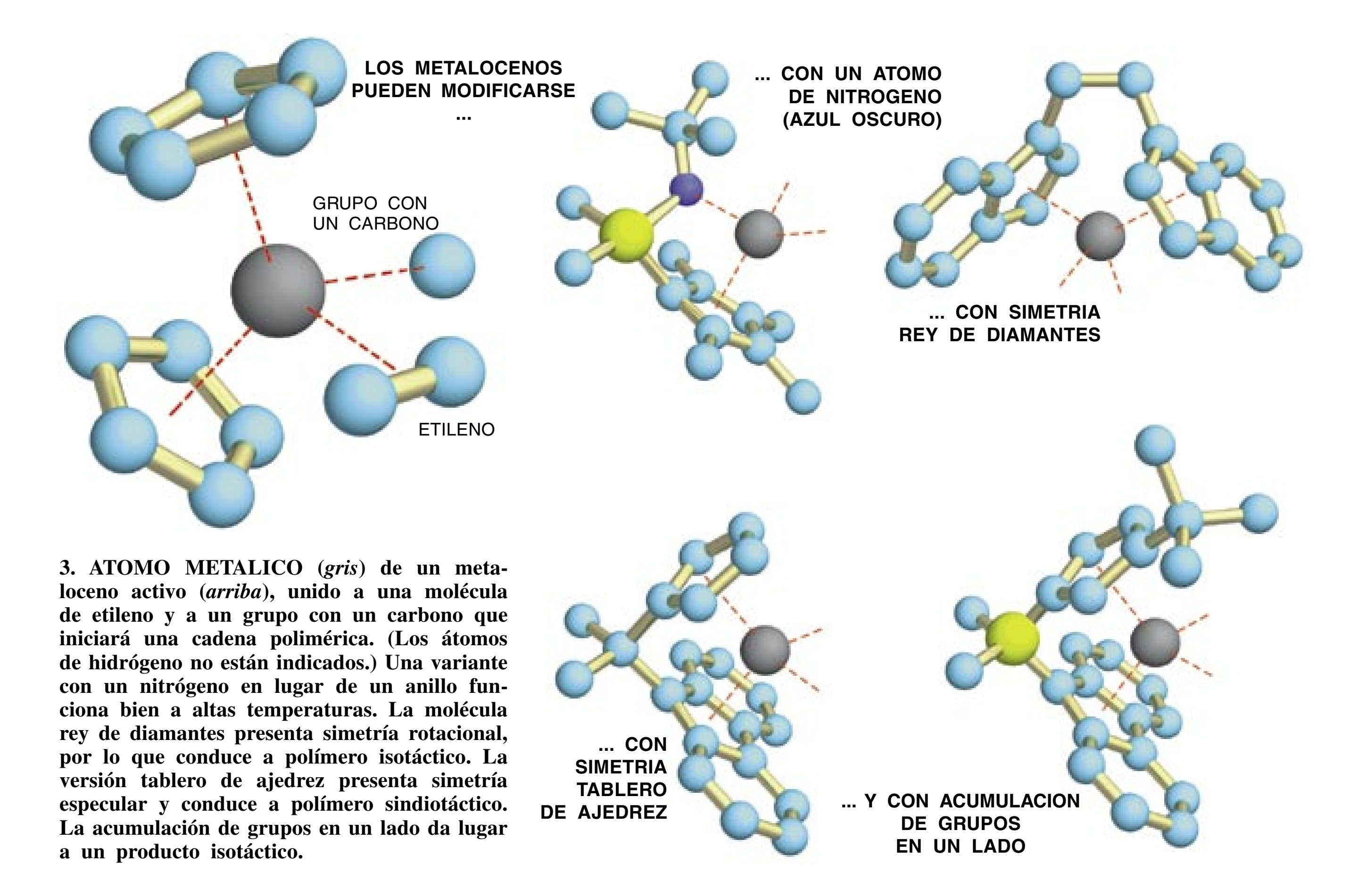
hora. Sin embargo, para hacer catalizadores de utilidad, algunas mejoras eran necesarias. Sospeché que el truco era variar el grado de congestión en torno a los anillos de cinco carbonos que rodean al átomo metálico: buena parte de la química consiste en ver cuánto espacio hay disponible para que ocurran cosas.

Con un asistente escéptico y desconfiado a remolque, experimenté primero con polietileno. Comenzamos de forma modesta, preparando y probando metalocenos en los que reemplazábamos un átomo de hidrógeno por un simple grupo de hidrocarburo. Aparecieron tendencias definidas. Por ejemplo, añadiendo un grupo que diera carga negativa a los anillos, era de esperar que el catalizador fuera más reactivo frente al etileno y, al trabajar más rápido, condujera a polímeros más largos. Muchos grupos, sin embargo, ocupaban demasiado espacio alrededor de los anillos y hacían al catalizador menos reactivo, por lo que las cadenas eran más cortas. Este tipo de observaciones nos proporcionaron un control directo, sin precedentes, sobre las propiedades de los polímeros. Hoy en día, los metalocenos permiten hacer cadenas de polietileno que contengan de unos pocos a cientos de miles de carbonos.

En cierto momento, probamos metalocenos en los que habíamos colocado un grupo de un carbono sobre cada uno de los 10 átomos de hidrógeno de ambos anillos. Dicho catalizador, que era mucho más congestionado espacialmente que la molécula inicial, mostró una importante propiedad. En mezclas de etileno y propileno, era 250 veces más reactivo frente al etileno que al propileno, más voluminoso. Esta selectividad hacia el monómero menor era mucho mayor que con el metaloceno original. La preferencia resultaba tan pronunciada, que el catalizador podía generar polietileno cristalino de cadena larga incluso en presencia de grandes cantidades de propileno o de moléculas mayores. El descubrimiento tenía consecuencias prácticas, ya que mezclando catalizadores con diferente grado de congestión, los químicos industriales podrían llevar a cabo reacciones diversas, perfectamente controladas, en un único reactor y simultáneamente. Podrían, por ejemplo, sintetizar en una sola etapa mezclas de polietileno cristalino y polímeros más flexibles, con cadenas laterales incorporadas por el catalizador menos congestionado.

A continuación emprendimos una etapa más arriesgada. Colocamos un puente con un átomo de silicio para unir ambos anillos de cinco carbonos por uno de sus lados. Suponíamos que dicha modificación mantendría los anillos hacia un lado, como si forzáramos las dos conchas de la almeja a permanecer abiertas. El efecto fue espectacular: el metaloceno resultante era mucho más reactivo frente al propileno y moléculas mayores que los metalocenos originales. Catalizadores con esta modificación estructural se emplean industrialmente hoy día para incorporar moléculas mayores en un polímero, como cadenas laterales.

Aunque ya estaba claro que los metalocenos poseían valiosas propiedades, un grave problema técnico limitaba su uso. A menos que los catalizadores se fijaran sobre una matriz, tendían a producir un polvo polimérico que se aglomeraba y pegaba por todas partes. El azar resolvió este problema, aunque unos años más tarde: en 1990 James C. Stevens, de la compañía Dow Chemical, ensayó un catalizador de titanio que estaba basado en un metaloceno pero con un átomo de nitrógeno en lugar de uno de los anillos de cinco carbonos. Dicho catalizador rápidamente gene-



3. ATOMO METALICO (*gris*) de un metaloceno activo (*arriba*), unido a una molécula de etileno y a un grupo con un carbono que iniciará una cadena polimérica. (Los átomos de hidrógeno no están indicados.) Una variante con un nitrógeno en lugar de un anillo funciona bien a altas temperaturas. La molécula rey de diamantes presenta simetría rotacional, por lo que conduce a polímero isotáctico. La versión tablero de ajedrez presenta simetría especular y conduce a polímero sindiotáctico. La acumulación de grupos en un lado da lugar a un producto isotáctico.

raba polietileno a las temperaturas relativamente altas que Dow empleaba para manufacturar sus plásticos. (Dow emplea temperaturas de más de 120 grados centígrados, cuando lo habitual son temperaturas de 50 a 70 grados.) A estas altas temperaturas, el polímero del proceso Dow es soluble, con lo que se evita el problema del polvo.

Dow adoptó rápidamente el catalizador. Otra sorpresa agradable fue que la estructura tan abierta del compuesto le permitía polimerizar con tanta avidez, que podía unir cadenas con cadenas laterales para generar polímeros con un grado de entrecruzamiento controlado. Los materiales resultantes, flexibles, los hace especialmente adecuados como aislantes para recubrir cables eléctricos.

Metalocenos de diversos tipos se emplean hoy día en numerosos procesos comerciales para la preparación de polietileno. Los productos son más homogéneos que los plásticos preparados con los catalizadores de Ziegler-Natta tradicionales, por lo que presentan propiedades notablemente mejoradas. Los fabricantes venden ahora mezclas poliméricas con cadenas de longitudes óptimas y óptimo contenido de cadenas laterales para usos específicos.

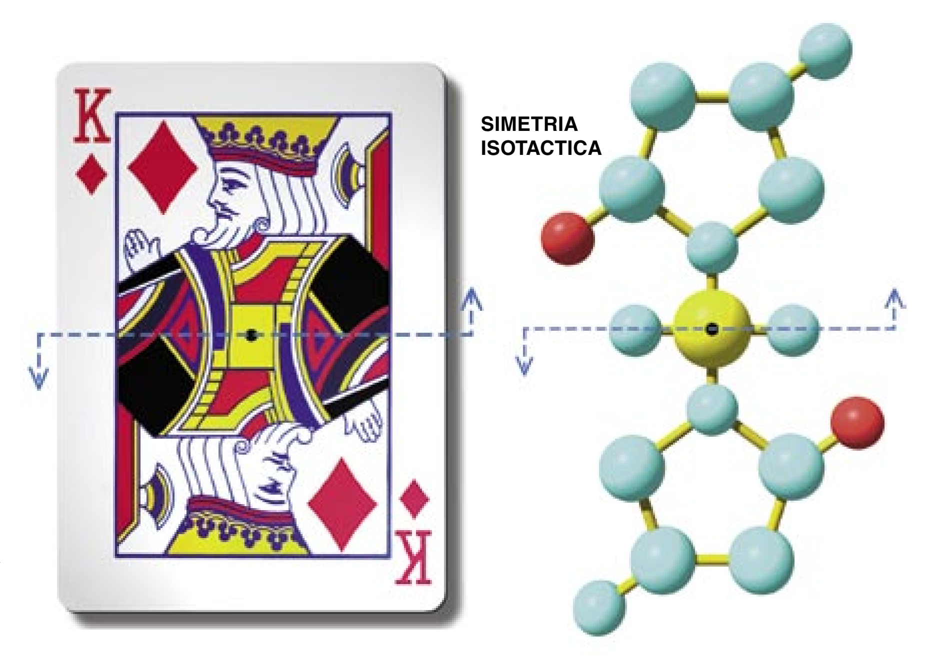
La temible simetría

En 1982 cambié de tema para investigar sobre la adaptación de los metalocenos a la manufactura del polipropileno, que representaba un reto más difícil por las dos orientaciones posibles, una reflejo de la otra, que aparecen al añadir un monómero. Un polipropileno en el que la gran mayoría de monómeros tenga la misma orientación que sus vecinos se denomina isotáctico. Las cadenas de polipropileno isotáctico encajan entre sí mejor que las de un polipropileno cuyas cadenas laterales se dispongan al azar, y el polímero resulta más duro y cristalino.

Para producir polipropileno isotáctico de alta calidad hay que asegurarse de que un 99 por ciento de las veces el monómero se inserte en el centro activo del catalizador en una única orientación. Yo sabía, por los trabajos de Adolpho Zambelli de la Universidad de Salerno, que había dos formas de ejercer dicho control con catalizadores de Ziegler-Natta. Una, denominada control de final de cadena, tiene lugar cuando determinados catalizadores actúan entre –30 y –80 grados centígrados. La baja temperatura disminuye la velocidad de movimiento de la cadena creciente con respecto al catalizador, pudiendo formarse fragmentos de monómeros con idéntica orientación. Sin embargo, los errores son frecuentes, y cuando intenté aplicar esta técnica empleando un metaloceno, los fragmentos resultaron demasiado cortos. El polímero obtenido era una sustancia elástica distendida de bajo punto de fusión, sin ninguna utilidad.

La segunda aproximación saca partido de la simetría del propio catalizador, de modo que un monómero sólo encaja en la orientación deseada, como una llave en su cerradura. En cuanto orienté mis esfuerzos en esta dirección, apareció un problema denominado reacción de salto atrás, que ya polímero isotáctico, necesitaba un catalizador diseñado de forma que la orientación de los monómeros adicionados fuera idéntica desde el punto de vista de cada enlace, al igual que, en los naipes del póquer, la cara de un rey de diamantes es vista de la misma forma por jugadores situados a lados opuestos de la mesa. Así, la orientación de cada monómero sería la misma, ocurriera o no el salto atrás. Sin embargo, existía otra complicación. Los anillos de cinco carbonos de los metalocenos giran rápidamente y cambian de lugar. Necesitaba un puente entre ambos anillos para hacer más rígida la estructura.

Un químico organometálico, Hans Brintzinger, de la Universidad de



4. VARIANTES DE CATALIZADOR METALOCENO presentadas como si fueran planas, con el átomo metálico central eliminado. La molécula de la izquierda presenta la simetría rotacional de un naipe de póquer. Da igual observarlo desde la derecha o desde la izquierda: siempre adiciona monómeros sobre la cadena con la misma orientación, creando polipropileno isotáctico. La molécula de la

Cossee había propuesto en su teoría sobre catalizadores de Ziegler-Natta tradicionales. Dichos catalizadores pueden producir polipropileno isotáctico, lo que para Cossee implicaba que, tras migrar y fusionarse a un monómero, una cadena debía saltar hacia atrás volviendo a la posición sobre la que estaba unida antes de la adición. Sin este salto atrás, como Cossee reconocía intuitivamente, la geometría de la cadena habría llevado a una alternancia en la orientación de los monómeros.

No estaba seguro de que el salto atrás pudiera producirse en los metalocenos. Por ello, para hacer un

Constanza, había sintetizado metalocenos de titanio que cumplían mis requerimientos. Los anillos estaban enlazados por una unión de dos carbonos, y grupos orgánicos unidos a los anillos imponían restricciones que, vistas desde cada una de ellas, eran idénticas. Era una molécula con la simetría de un naipe de baraja. El polímero resultante sería isotáctico, independientemente de que ocurrieran o no las reacciones de salto atrás de Cossee.

Las posibilidades de éxito parecían minúsculas, pero la apuesta funcionó. Todavía recuerdo mi alegría al ver los primeros miligramos

de propileno isotáctico, cristalino, formado por un metaloceno dando vueltas en un matraz de Pyrex con tolueno como disolvente. En el grupo de Paolo Corradini, en Milán, calcularon entonces que los anillos de cinco carbonos modificados forzaban a la cadena a alejarse de ellos, lo que ubicaba adecuadamente al propileno para formar el polímero isotáctico. Preparé otro catalizador que era idéntico, con la salvedad de que carecía de la simetría de naipe de póquer. Como era de esperar, produjo material con monómeros orientados aleatoriamente, ya que los dos anillos no podían ya controlar conjuntamente la orientación de los monómeros.

publicar mi trabajo en un artículo a finales de dicho año. El artículo atrajo considerable interés científico, y en 1985 me incorporé a Fina Oil and Chemical.

Cinco años después, tras los avances que describo a continuación, los metalocenos se convirtieron en el tema más de moda de la química de catálisis. Tanto yo como otros estábamos muy cerca de comercializar la manufactura de polipropileno con metalocenos. Entonces, Exxon presentó una acusación contra mí, reclamando la propiedad de prácticamente todo mi trabajo sobre metalocenos. El pleito y mi reclamación posterior por libelo duraron cinco años. En 1995, un jurado me absolvió por completo, y un científico de Exxon fue declarado culpable de haber mandado, de forma anónima, copias de los temas en litigio a científicos de todo el mundo. Muchos de ellos me ayudaron en el juicio. Siempre les estaré agradecido por su apoyo.

derecha presenta la simetría de imagen especular, como las piezas sobre un tablero de ajedrez. A medida que el polímero creciente migra de un lado al otro, el catalizador adiciona monómeros en orientaciones alternadas, creando polímero sindiotáctico. Los átomos coloreados en rojo desmpeñan un papel importante al impedir la terminación prematura de las cadenas poliméricas.

El polipropileno preparado con el compuesto de Brintzinger todavía producía numerosas inserciones erróneas como para poder competir con el material de Ziegler-Natta comercial. Probé una versión ligeramente más congestionada, que mejoró algo el producto, aunque aún presentaba problemas: los catalizadores de titanio que estaba empleando no duraban mucho tiempo a las temperaturas requeridas.

Llegados a este punto, Exxon no mostró ya interés en desarrollar los metalocenos para la producción de polipropileno, y abandoné la compañía en 1984. Exxon me permitió

Moléculas especulares

En Fina, en mi pequeño grupo de investigación sobre metalocenos trabajaban Michael J. Elder y Larry Jones, que hicieron prácticamente todo el apasionante trabajo que describo a continuación. Nos unimos al esfuerzo mundial de mejorar la acción de los metalocenos en la preparación comercial de polipropileno.

En 1985, Kaminsky y Brintzinger, esperando producir mejores materiales isotácticos, probaron la versión de zirconio del metaloceno de titanio de Brintzinger que yo había estudiado anteriormente. Aunque el compuesto de zirconio actuaba con rapidez, los polímeros resultantes eran de una longitud tan sólo de una décima parte de la requerida: formaban una cera quebradiza de bajo punto de fusión. Probé a reemplazar el zirconio por el raro metal hafnio, pero tampoco conseguí incrementar significativamente el punto de fusión.

Logramos finalmente aumentar el punto de fusión del polímero empleando catalizadores aún más rígidos, en los que ambos anillos de cinco carbonos estaban unidos mediante un átomo de silicio. Introduciendo grupos atómicos voluminosos en los lados de los anillos situados al lado opuesto del puente de silicio se mejoraron aún más los resultados, al reducir el espacio para posibles inserciones erróneas. Todos los metalocenos comerciales actuales emplean este tipo de innovaciones.

En 1987 puse a prueba simultáneamente la teoría de Cossee sobre la migración de cadena/salto atrás y la extensión de la misma de Dyachovskii-Shilova-Shilov al metal cargado positivamente de los metalocenos. Si la reacción de migración de cadena ocurría realmente en los metalocenos, deberíamos poder aprovechar el efecto para preparar polipropileno en el que los monómeros estuvieran orientados de forma alternativa. Dicha forma se conoce como sindiotáctica, y alberga valiosas propiedades. Comparada con la forma isotáctica, posee mayor resistencia al impacto, resulta más transparente y es particularmente resistente a los rayos gamma empleados para esterilizar algunos alimentos y material médico.

Por entonces, este polímero sólo podía prepararse en el laboratorio, en cantidades minúsculas. Mi idea era que podríamos prepararlo en cantidades grandes si las dos posibles posiciones de enlace para el propileno impusieran restricciones que fueran imágenes especulares una de la otra. Esa es la simetría de las piezas de ajedrez al comienzo de una partida. Para las blancas, la dama está a la izquierda del rey. Para las negras, ocurre lo contrario.

Mi idea era complicada, pero seleccioné un compuesto que poseía dos anillos de seis carbonos situados a

ambos lados de uno de los anillos de cinco carbonos. Un puente conectaba los dos anillos de cinco carbonos. El éxito de este experimento probó por primera vez que tanto Dyachovskii como Cossee estaban en lo cierto: el átomo metálico cargado promovía una migración de cadena que permitía al metaloceno producir material sindiotáctico. Al principio, algunos químicos veteranos se negaron a creerlo. Pero, de nuevo, el final de la cadena, junto a las restricciones impuestas por la simetría de tablero de ajedrez en el centro activo, dictaban la orientación del monómero. A medida que la cadena migraba de un lado al otro del catalizador tras cada adición, los nuevos monómeros se insertaban automáticamente en orientaciones alternadas.

Este catalizador fue también el primer metaloceno basado en zirconio capaz de generar polipropileno de cualquier tipo con cadenas tan largas como las de los polímeros comerciales. La clave resultó ser que en los sustituyentes sobre el anillo de cinco carbonos modificado había dos átomos de carbono situados de tal forma que impedían la terminación prematura de la cadena. Se había resuelto, pues, de forma inesperada, el problema práctico de la longitud de la cadena, que había complicado tanto el empleo de los metalocenos de zirconio. Y así, el propileno sindiotáctico se ha convertido en el plástico preferido para determinadas aplicaciones críticas, en especial en el campo médico, en donde es muy apreciado en recipientes para sangre y prendas estériles.

Un experimento adicional proporcionó nuevas pruebas a favor de la teoría de Cossee. Cuando al catalizador que hacía polipropileno sindiotáctico se le bajaba la concentración de propileno, decrecía el punto de fusión del producto. Esto ocurría porque, bajo estas condiciones, se omitían algunas inserciones; la cadena tenía que saltar hacia atrás a su posición previa antes de que pudiera añadirse un nuevo monómero, por lo que algunos monómeros se incorporaban en la misma orientación que sus vecinos. La imperfección llevaba a una desorganización de la estructura cristalina.

Desde entonces, los investigadores han realizado algunas variaciones estructurales sobre este valioso catalizador que han proporcionado nueva información. Por nuestra parte, diseñamos una versión modificada en la que, cuando la cadena estaba en una de sus dos posibles posiciones, daba lugar a inserciones isotácticas, mientras que en la otra posición el catalizador era efectivamente simétrico y, por tanto, daba lugar a inserciones aleatorias. El resultado fue la elegante molécula de polipropileno semi-isotáctico.

Otra variación consistía en incrementar la congestión sobre uno de los lados del catalizador, de forma que cuando la cadena se encontrara en dicha posición estuviera obligada a saltar atrás sin poder añadir un nuevo monómero. El resultado predecible era polipropileno isotáctico. Treinta años después de que Cossee propusiera osadamente su mecanismo de salto atrás para explicar cómo los complejos compuestos de Ziegler-Natta podían producir polímero isotáctico, habíamos conseguido producir un catalizador, cabalmente conocido, basado en el salto atrás para producir material isotáctico de la misma longitud de cadena y punto de fusión.

Exxon me había contratado para desentrañar los misterios de los catalizadores de Ziegler-Natta. No encontré ningún misterio. La mayoría de las preguntas habían sido ya respondidas por Zambelli, Cossee y Dyachovskii y sus colegas. Demostrando sus predicciones, pude agradecidamente usar sus teorías para diseñar nuevos catalizadores. Dichos catalizadores, obedientes, fabricaron entonces polímeros que rejuvenecieron una industria de 40 años.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CHEMISTRY OF CATIONIC DICYCLOPENTADIENYL GROUP 4 METAL-ALKYL COMPLEXES. Richard F. Jordan en *Advances in Organometalic Chemistry*, vol. 32, págs. 325-387; 1991.

METALLOCENE/PROPYLENE STRUCTURAL RELATIONSHIPS: IMPLICATIONS ON POLYMERIZATION AND STEREOCHEMICAL CONTROL MECHANISMS. J. A. Ewen, M. J. Elder, R. L. Jones, L. Haspeslagh, J. L. Atwood, S. G. Bott y K. Robinson en *Die Makromolekulare Chemie: Macromolecular Symposia*, volúmenes 48-49, páginas. 253-295; agosto de 1991.

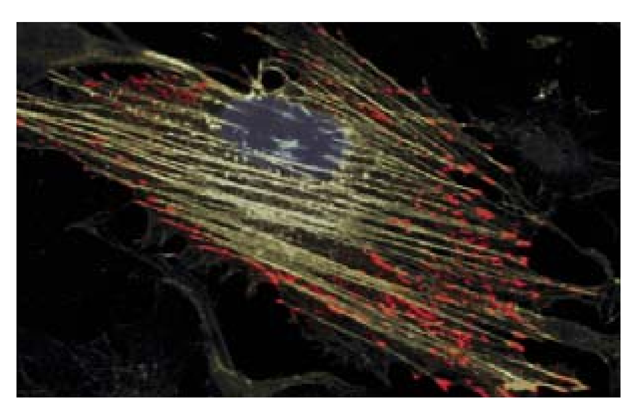
STEREOSPECIFIC OLEFIN POLYMERIZATION WITH CHIRAL METALLOCENE CATALYSTS. H. H. Brintzinger, D. Fischer, R. Mulhaupt, B. Rieger y R. M. Waymouth en *Angewandte Chemie, International Edition in English*, vol. 34, n.º 11, págs. 1143-1170; 16 de junio de 1995.

Integrinas y salud

Descubiertas muy recientemente, estas moléculas adhesivas presentes en la superficie celular se han revelado imprescindibles para el buen funcionamiento del cuerpo y para la propia vida

Alan F. Horwitz

Las células del cuerpo se mantienen pegadas unas a otras y a un material cohesivo, o matriz extracelular, que las circunda. Esa cohesión es esencial para la supervivencia, ya que mantiene unidos los tejidos. Resulta importante también para el desarrollo embrionario y toda una serie de procesos que acontecen en el organismo adulto, como la coagulación sanguínea, la curación de las heridas y la erradicación de las infecciones. Paradójicamente, esa misma adhesividad celular puede facilitar la aparición de la artritis reumatoide, los ataques cardíacos, los accidentes cerebrovasculares y el cáncer, entre otras condiciones patológicas.



1. CELULA coloreada para resaltar las fibras de actina (*color amarillento*) que forman su entramado interno y las integrinas (*naranja*) que conectan dicho entramado con la proteína fibronectina, presente en la matriz externa.

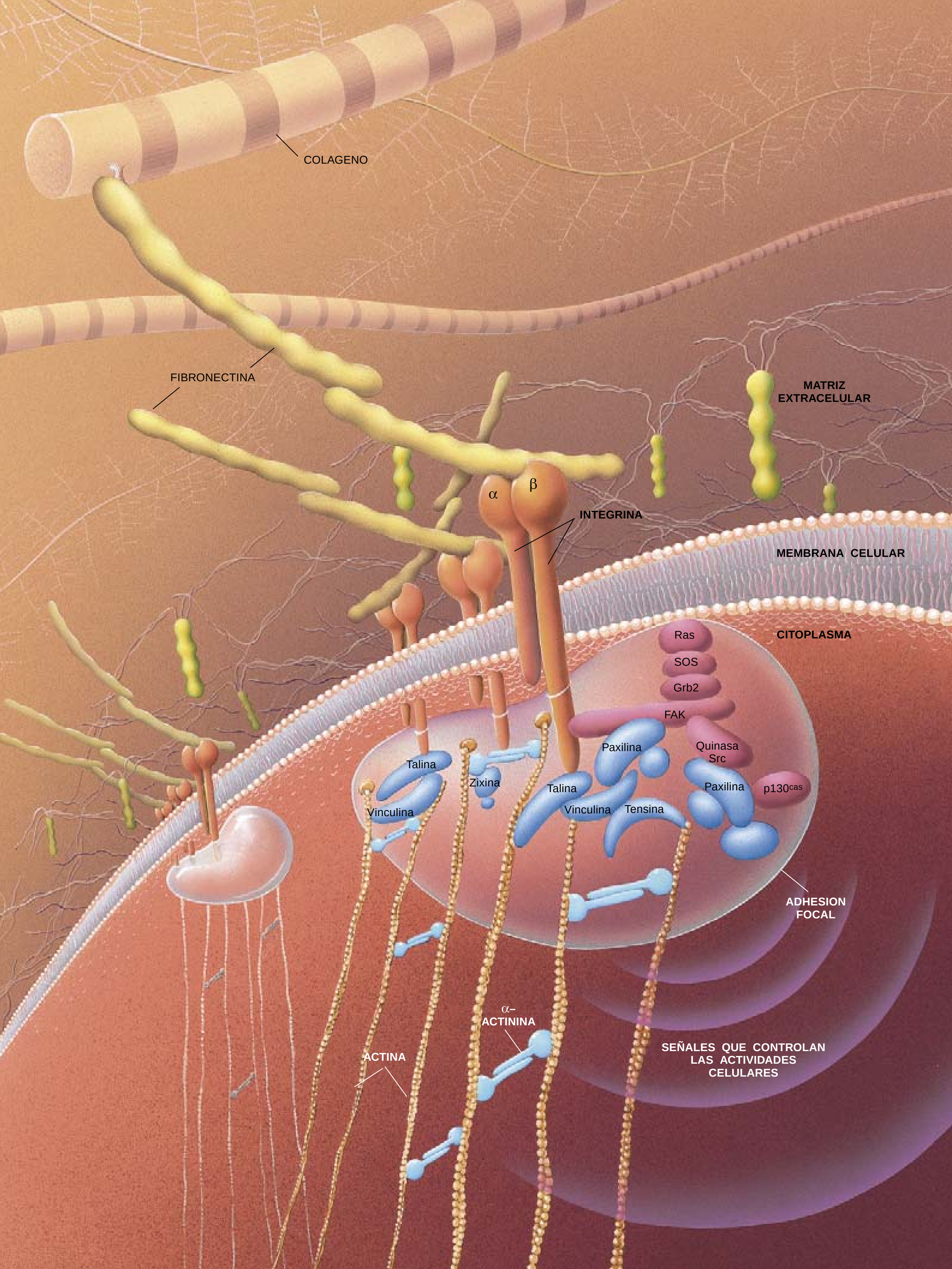
Aunque se conocía desde tiempo atrás la importancia de las interacciones adhesivas que se producen en el cuerpo, sólo recientemente se ha empezado a desentrañar sus diversos efectos fisiológicos. Los primeros resultados esclarecedores se obtuvieron hace unos 20 años, al aislarse algunas de las moléculas de la matriz que se pegan a las células. Las investigaciones de los últimos 15 años han puesto de manifiesto que unas moléculas presentes en la superficie celular, las integrinas, desempeñan un papel fundamental en muchos fenómenos relacionados con la adhesión. Como no podía ser menos, los laboratorios farmacéuticos están ya aplicando esos conocimientos al desarrollo de nuevos tratamientos contra ciertas enfermedades.

Me cupo la fortuna de ser uno de los investigadores que identificaron las primeras integrinas y descubrieron su actividad. La historia de las integrinas, sin embargo, no es patrimonio de un solo centro. Antes al contrario, el conocimiento de su mecanismo de funcionamiento ha sido posible gracias a la cooperación entre equipos que investigaban procesos muy distintos. A unos nos interesaba el desarrollo embrionario; a otros, el funcionamiento del cuerpo adulto o el desarrollo de determinadas enfermedades. Pero el flujo de información entre todos los comprometidos ha sido incesante, lo que ha permitido progresar a un ritmo acelerado.

Las interacciones que se establecen entre los componentes de la matriz y las células del epitelio mamario constituyen un ejemplo espectacular de la importancia que la adhesión encierra para el correcto funcionamiento celular. Las células epiteliales, en general, forman la piel y el revestimiento de la mayoría de las cavidades del organismo. Acostumbran disponerse en una monocapa que se apoya sobre la lámina basal, una matriz peculiar. Las células epiteliales que recubren las glándulas mamarias producen leche en respuesta a un estímulo hormonal. Si se extraen las células epiteliales mamarias de un ratón y se cultivan en el laboratorio, pierden rápidamente su forma cuboide regular, así como la capacidad para fabricar proteínas lácteas. Sin embargo, si se cultivan en presencia de laminina (la principal proteína adhesiva de la lámina basal), recuperan su morfología propia, organizan una lámina basal y configuran estructuras pseudoglandulares capaces nuevamente de producir componentes de la leche.

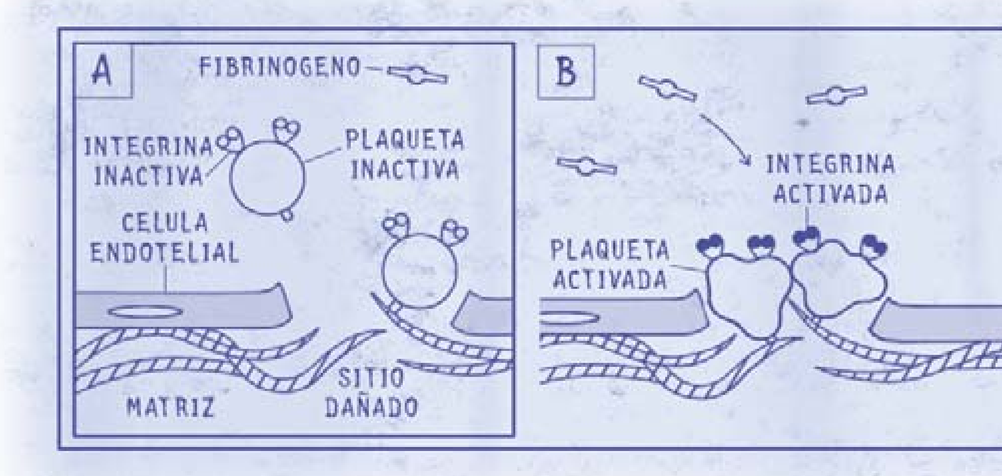
A principios de los años ochenta, los empeñados en descubrir de qué modo la matriz extracelular controlaba la actividad de las células habían conseguido algunos progresos a partir del estudio de la propia matriz. Averiguaron que la matriz venía a ser un gel formado por cadenas de azúcares y proteínas fibrosas interconectadas, si bien la cantidad de matriz y los pormenores de su estructura variaban de un tejido a otro. Proteínas de la matriz son, por ejemplo, la

2. LAS INTEGRINAS (*naranja*) atraviesan las membranas celulares. Por uno de sus extremos, se unen a moléculas de la matriz extracelular (o a moléculas presentes en otras células); por el otro, se anclan en el citoesqueleto o entramado interno de la propia célula. De esta manera, consiguen que una célula se mantenga en su lugar. Las integrinas se traban con el entramado interno a través de un agregado molecular muy organizado (adhesión focal), que abarca diversos componentes del citoesqueleto: actina, talina, vinculina y α-actinina. Se ha comprobado que las integrinas transmiten mensajes desde la matriz hacia el interior de las células. En estos procesos participan también componentes de los sistemas de transmisión de señales presentes en las adhesiones focales (*magenta*). (La configuración de las adhesiones focales puede variar.)



COLAGENO
FIBRONECTINA
MATRIZ EXTRACELULAR
α
β
INTEGRINA
MEMBRANA CELULAR
CITOPLASMA
Ras
SOS
Grb2
FAK
Paxilina
Quinasa Src
Talina
Zixina
Talina
Paxilina
p130cas
Vinculina
Vinculina
Tensina
ADHESION FOCAL
α–ACTININA
ACTINA
SEÑALES QUE CONTROLAN LAS ACTIVIDADES CELULARES

ALAN F. HORWITZ enseña biología celular y estructural en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Tras doctorarse en biofísica por la de Stanford, en 1969, se aplicó al estudio de la espectroscopía de resonancia magnética en la Universidad de California en Berkeley. Cinco años después, se trasladó a la de Pennsylvania, donde empezó a interesarse por los fenómenos de adhesión. En 1987, Horwitz creaba en la Universidad de Illinois su propio departamento, donde investiga la adhesión en los procesos de migración y diferenciación celular.



laminina, fibronectina (otra molécula adhesiva) y el colágeno; este último, aunque a veces es adhesivo, constituye el componente estructural primario de la mayoría de las matrices. Y gracias a la microscopía se sabía que las moléculas adhesivas de la matriz estaban ligadas, presumiblemente a través de una o más moléculas intermediarias, al sistema de fibras intracelulares (citoesqueleto) que proporciona a las células su forma tridimensional.

También se sabía que las uniones célula-matriz podían afectar a las células de diversas maneras según el tipo celular, el estado de la célula en ese momento y la composición específica de la matriz. Unas veces, las células responden cambiando su forma; otras, emigran, proliferan, se diferencian (se especializan) o modifican ligeramente sus actividades. Los cambios pueden deberse a una alteración en la actividad de algunos genes. Los genes especifican la secuencia de aminoácidos de las proteínas, moléculas encargadas de ejecutar la mayoría de las funciones celulares. Cuando los genes se activan, esto es, se expresan, producen la proteína especificada. Según qué genes se hallen activos o inactivos, el contenido proteínico de las células cambia y, por tanto, el tipo de operaciones que dichas células pueden acometer.

Para acotar de qué manera la matriz extracelular provocaba tales cambios en las células, había que identificar los receptores celulares, que son los sitios que reconocen las proteínas de la matriz. Un método usual de aislar el receptor para una molécula determinada consiste en purificar los componentes del extracto celular que se adhieren a dichas moléculas. En este caso, sin embargo, los receptores se resistían a la purificación.

Culpable de ello, lo sabemos ahora, era, por un lado, cierto fenómeno: las moléculas de adhesión de la matriz pueden unirse a muchos tipos de sustancias, algunos de los cuales son también componentes de la matriz. El problema pudo resolverse al descubrirse el sitio por donde la fibronectina se engarzaba en las células. Curiosamente, esa región es una secuencia de tres aminoácidos: arginina, glicina y aspartato. (Se le suele denominar RGD, por ser esas letras las correspondientes al código utilizado para nombrar a los aminoácidos.)

Por otro lado, ocurre a menudo que los receptores, individualmente considerados, no se traben con fuerza a las proteínas de la matriz. La adhesión fuerte se logra mediante una suerte de "efecto velcro", en virtud del cual muchas uniones relativamente débiles forman en conjunto una vinculación muy intensa. Por ello, las uniones con los receptores individuales no duraban lo suficiente para "cazarlos" a la primera.

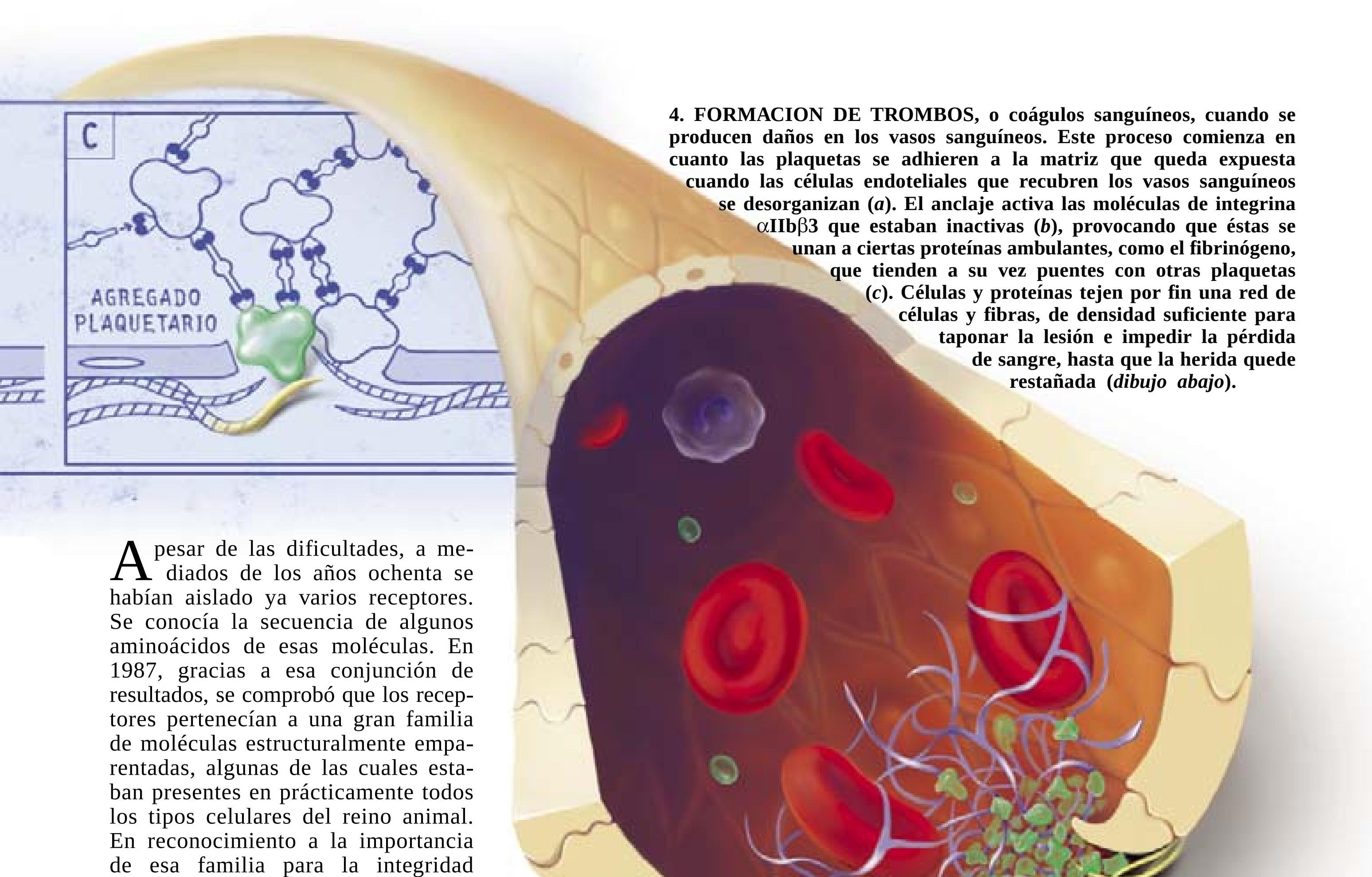








3. LA MADURACION CELULAR y la embrionaria requieren el anclaje de las células en la matriz extracelular, por lo común a través de integrinas. Las células del epitelio mamario de ratón cultivadas pierden su forma característica y la capacidad de producir proteínas de la leche (*arriba, a la izquierda*). Recuperan su estructura (*abajo, a la izquierda*) y función sólo cuando se les proporcionan ciertas moléculas de la matriz. Un embrión normal de ratón comienza a formar la placenta (*arriba, a la derecha*) al noveno día de gestación. Sin integrina α4, el embrión no forma placenta (*abajo, a la derecha*) y muere al poco tiempo.



4. FORMACION DE TROMBOS, o coágulos sanguíneos, cuando se producen daños en los vasos sanguíneos. Este proceso comienza en cuanto las plaquetas se adhieren a la matriz que queda expuesta cuando las células endoteliales que recubren los vasos sanguíneos se desorganizan (*a*). El anclaje activa las moléculas de integrina αIIbβ3 que estaban inactivas (*b*), provocando que éstas se unan a ciertas proteínas ambulantes, como el fibrinógeno, que tienden a su vez puentes con otras plaquetas (*c*). Células y proteínas tejen por fin una red de células y fibras, de densidad suficiente para taponar la lesión e impedir la pérdida de sangre, hasta que la herida quede restañada (*dibujo abajo*).

A pesar de las dificultades, a mediados de los años ochenta se habían aislado ya varios receptores. Se conocía la secuencia de algunos aminoácidos de esas moléculas. En 1987, gracias a esa conjunción de resultados, se comprobó que los receptores pertenecían a una gran familia de moléculas estructuralmente emparentadas, algunas de las cuales estaban presentes en prácticamente todos los tipos celulares del reino animal. En reconocimiento a la importancia de esa familia para la integridad estructural de células y tejidos, se impuso a las moléculas el nombre de "integrinas". Andando el tiempo, y por otras razones que explicaré, se vio cuán pertinente había sido tal denominación.

Mientras tanto, las investigaciones sobre la estructura y función de las integrinas empezaban a dar sus frutos. El descubrimiento de la ubicuidad de las integrinas en la mayoría de los tejidos celulares nos hizo caer en la cuenta de que algunas preguntas de difícil respuesta en ciertos tipos celulares podrían abordarse en otros de más fácil manipulación. Merced a tamaña flexibilidad y al intercambio de resultados de muchas disciplinas distintas, se avanzó rápidamente y se abrieron nuevas perspectivas.

Comprobamos muy pronto que las integrinas constaban de dos cadenas o subunidades. De la subunidad denominada "alfa" conocemos unas 15 variantes y de la "beta", unas ocho. Las cadenas, que se designan con un número o una letra, se combinan para crear al menos 20 integrinas diferentes. También comprobamos que ciertas integrinas se adhieren a un solo tipo de moléculas efectoras, en tanto que otras reconocen varias dianas distintas. La mayoría de las integrinas interaccionan con la matriz extracelular. Algunas participan en las adhesiones intercelulares y la mayoría de las moléculas responsables de ese tipo de adhesión célula-célula pertenecen a grupos que se conocen con los nombres de cadherinas, selectinas o inmunoglobulinas. Hallamos, asimismo, que las integrinas atraviesan la membrana celular. La parte de las cadenas alfa y beta que sobresale de las células forma el receptor de la fibronectina y de otras moléculas extracelulares o ligandos.

Para que las conexiones extracelulares permanezcan prietas, la porción de integrina que se insiere en el citoplasma (o fluido interno de la célula) debe anclarse en el citoesqueleto. Vale la pena exponer cómo se establecen tales engarces. Cuando se produce la unión molécula-receptor fuera de la célula y el receptor se agrega a otras integrinas, que a su vez se han unido con otras moléculas, se crean unos complejos muy organizados: las "formas de adhesión focales". Estas adhesiones, que pueden variar en tamaño y estructura, incorporan varios tipos de moléculas, incluidas las colas citoplásmicas de las agrupaciones de integrinas y algunos componentes del citoesqueleto. La unión y la agregación con el receptor provocan también la reorganización del citoesqueleto; las células, que eran redondeadas, adoptan una estructura definida.

La unión, mediada por integrinas, de las células a una matriz facilita el movimiento de las células, sobre todo durante el desarrollo embrionario de los organismos y en el caso de los leucocitos del sistema inmunitario. La emigración comienza con el despliegue de una suerte de pseudópodos en la región frontal de la célula. A continuación, las moléculas de integrina cercanas al extremo delantero de ese pseudópodo interaccionan con la matriz sobre la que se sustentan; esa interacción genera una tracción que va a permitir el movimiento celular. Contemporáneamente, se sueltan

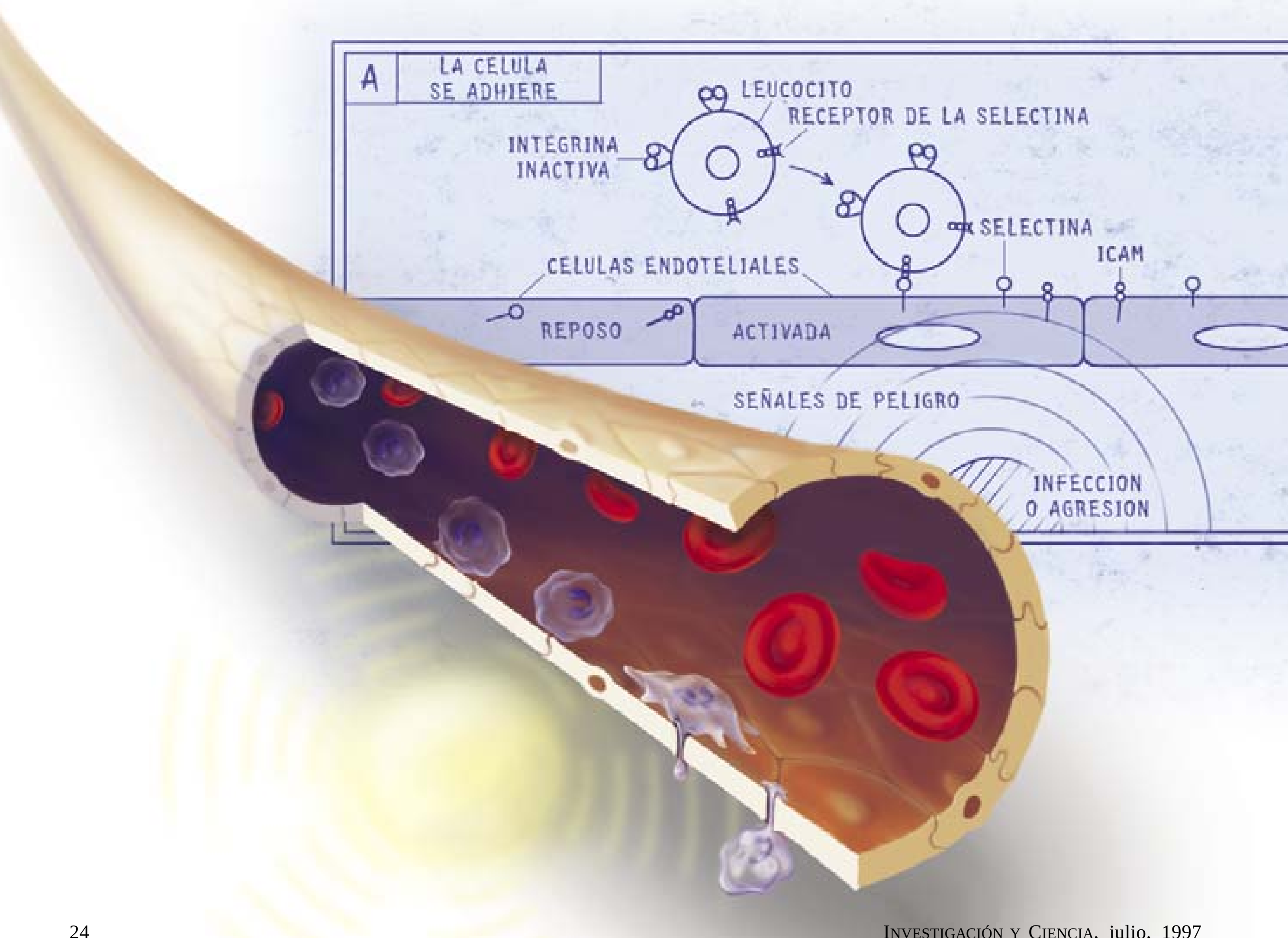
otros ligámenes de la región posterior de la célula, lo que provoca que esta parte trasera se mueva hacia delante, como si se dejara libre el extremo de un resorte. Desconocemos qué fuerzas son las responsables de que se liberen las conexiones de la matriz con la región trasera de la célula. E ignoramos qué fuerzas mecánicas y bioquímicas inducen el avance celular, desde la región frontal o desde el impulso trasero, en un ciclo que se repite una y otra vez.

Además de hacer las veces de "pegamento" celular y de facilitar la emigración, las integrinas ejercen un tercer efecto, muy potente, sobre las células. Alrededor del año 1990, se supo que la unión extracelular entre las integrinas y las moléculas provocaba, en el interior de las células, la activación de las rutas de transducción de señales. Esas vías, constituidas por moléculas que liberan mensajes a través del citoplasma, desencadenan, entre otras respuestas, la expresión génica, división celular y la inducción de procesos que impiden la autolisis de las células.

Poco después, se descubrió que las integrinas modulaban los mensajes que los factores de crecimiento transmiten a las células. Ya se sabía que los factores de crecimiento, que viajan de una célula a otra, activaban rutas específicas de transmisión de señales que controlan qué genes deben expresarse y si una célula debe reproducirse o incluso sobrevivir. Lo que el estudio de las integrinas demostraba era que las células normales (no malignas), para vivir y reproducirse, debían anclarse en una matriz específica cuando las estimulaban los factores de crecimiento. La falta de factores de crecimiento o la pérdida de los contactos adhesivos hacen que una célula en división deje de proliferar y termine por morir. Casi tres años después de recibir su bautismo, las integrinas hacían honor a su nombre por un motivo distinto. Estas moléculas participan en la integración de muchos de los tipos de señales que afectan a las células y determinan, en tal cometido, su destino.

Parece que buena parte de estos sistemas de señalización interna dependen de la activación de moléculas que también están presentes, junto con las integrinas, en las adhesiones focales. Esta función se ha estudiado más a fondo en fibroblastos (células del tejido conectivo), donde los complejos son bastante grandes, pues constan de una veintena larga de moléculas diferentes.

Se sabe, desde hace tiempo, que algunas de las moléculas presentes en esas adhesiones focales (como las enzimas de la familia de quinasas Src) intervienen en rutas de señales que se activan por factores de crecimiento. Su presencia en los complejos sugiere que las moléculas de la matriz y los factores de crecimiento pueden a veces modular sus mensajes mutuamente, enviando señales allá donde las rutas convergen o se cruzan. Otras moléculas de adhesión focal que se activan por integrinas (quinasas de adhesión focal, paxilinas y tensinas) apenas si experimentan los efectos de los factores de crecimiento. No obstante, ofrecen sitios de unión para componentes conocidos de transducción de señales, una propiedad que sugiere que ellas también coadyuvan a transmitir mensajes desde



las integrinas a los genes y a otras partes de la célula.

Lo que no está tan claro es cómo las integrinas estimulan a las moléculas señalizadoras presentes en las adhesiones focales. Ciertos tipos de moléculas de superficie celular, en particular muchos receptores de factores de crecimiento, son quinasas de tirosinas. Estas moléculas añaden grupos fosfato a residuos de tirosina que hay en otras proteínas, regulando así la actividad de las moléculas diana. Pero las integrinas carecen de actividad quinasa. Tampoco son fosfatasas, enzimas que controlan a otras moléculas, quitándoles grupos fosfatos. Ni poseen las integrinas sitios normales de acoplamiento mediante los cuales las moléculas transductoras de señales se traban entre sí; lo que significa, a buen seguro, que las integrinas no alteran directamente esas moléculas. ¿Cómo provocan, entonces, tal profusión de señales internas? Podría ser que coadyuvaran a que las moléculas señalizadoras entraran en contacto unas con otras; podría ser, pero nadie tiene aún una respuesta definitiva.

Las integrinas no responden sólo a señales recibidas desde el exterior de las células. También reaccionan a mensajes recibidos desde el interior. Estas señales de dentro a fuera pueden hacer que las integrinas se vuelvan más o menos selectivas a la hora de aceptar las moléculas con las que deben unirse y, asimismo, pueden cambiar la fuerza con que las integrinas se traban. La integrina $\alpha2\beta1$, por ejemplo, puede estar inactiva, ser un receptor para el colágeno o un receptor para el colágeno y la laminina, según la célula que la produzca y las señales que reciba desde el interior celular.

Las señales de dentro a fuera han sido objeto de exhaustiva investigación en las plaquetas, glóbulos rojos sin núcleo que participan en la formación de los coágulos sanguíneos o trombos. Los trombos se forman en las zonas dañadas de los vasos sanguíneos e impiden, momentáneamente, que se pierda sangre. Las plaquetas que circulan por la sangre lo hacen de forma independiente, y no se pegan unas a otras. No obstante, cambian su comportamiento cuando los vasos sanguíneos, que están recubiertos por una monocapa de células endoteliales, resultan dañados.

En primer lugar, las plaquetas se pegan (sin ayuda de las integrinas) a zonas de la matriz extracelular que quedan a la vista tras la desorganización de las células endoteliales. Esta adhesión, o la posterior unión con una proteína denominada trombina, envía una señal al citoplasma, que finalmente determina la activación de la integrina αIIbβ3, ubicada en la superficie de las plaquetas. En este caso, la señal provoca que la integrina se torne más adhesiva. Una vez activada, la integrina αIIbβ3 se aferra a las moléculas circulantes de fibrinógeno o factor de von Willebrand, tendiendo puentes moleculares con otras plaquetas y con la matriz. El agregado de plaquetas y proteínas resultante culmina en un denso entramado de células y fibras.

Además de examinar los efectos de las integrinas sobre células individuales, los expertos se han interesado por el papel de esas moléculas en el conjunto del cuerpo. Paradójicamente, sabemos menos del papel que desempeñan las integrinas en la maduración de un embrión que de su participación en algunos otros procesos, a pesar de que fue el interés por conocer las bases moleculares del desarrollo lo que fomentó las investigaciones que han llevado al descubrimiento de las integrinas y otras moléculas de adhesión.

Tenemos pruebas, no obstante, de que el desarrollo normal requiere el funcionamiento correcto de las integrinas. A medida que las células de un embrión proliferan y se diferencian para formar los tejidos y órganos del cuerpo, van añadiendo y quitando integrinas de su superficie, indicio claro de que las integrinas que se añaden participan en la transición de un estadio a otro nuevo. Otra prueba de la necesidad de su presencia la tenemos en el descubrimiento de que las células embrionarias poseen integrinas específicas que les ayudan a moverse y encontrar sus destinos finales.

La ingeniería genética ha permitido producir moscas de la fruta y ratones que carecen de una u otra integrina. Esos animales son deformes o mueren durante el desarrollo, demostrando así que la falta de tales integrinas es la causa de su fallo. En los embriones con malformaciones, la desorganización de los tejidos se debe, aparentemente, a que las células son incapaces de moverse hasta los sitios adecuados o no producen los contactos adhesivos que se necesitan para la cohesión. En efecto,

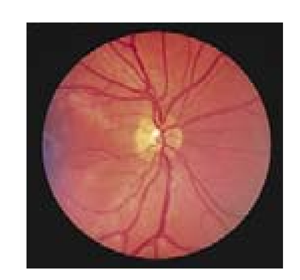
5. DEFENSA CONTRA LAS INFECCIONES, un proceso que requiere que ciertas células blancas de la sangre (leucocitos) abandonen el torrente circulatorio y emigren hacia el tejido dañado o enfermo (*dibujo de la izquierda y detalles en las viñetas superiores*). En primer lugar, los leucocitos se adhieren débilmente a las células endoteliales mediante interacciones con selectinas (*a*), para desplazarse a lo largo de la pared del vaso sanguíneo (*b*). A continuación, se activan ciertas integrinas de las células blancas (normalmente con cadenas $\beta1$ o $\beta2$) (*c*) y se adhieren a las ICAM (moléculas de adhesión intercelular). Estas uniones detienen el movimiento de los leucocitos, haciendo que dichas células se aplanen; en tal conformación se abren paso a través de las células endoteliales (*d*), abandonan los vasos sanguíneos y, sirviéndose de un repertorio similar de uniones, siguen una estela de atrayentes químicos hasta el lugar de la infección.

en ciertos mutantes de la mosca de la fruta, los músculos recién formados se deshacen a las primeras contracciones, pues las células musculares se separan del tejido conectivo.

Las integrinas cumplen una misión importante en la fisiología normal de los organismos maduros. Sabemos, además, de su intervención en determinadas patologías. Un proceso crítico que requiere integrinas es la inflamación, serie compleja de respuestas que se ponen en marcha tras una lesión o una infección. Cuando se lesiona un tejido o lo coloniza un microorganismo patógeno, ciertos leucocitos, como los neutrófilos y los monocitos, abandonan el torrente sanguíneo y se dirigen a la zona afectada. Allí eliminan restos y sustancias extrañas y atacan a los patógenos. Además, los leucocitos secretan sustancias que retrasan el avance de la infección. Si es necesario, las células reclutan también linfocitos para destruir a los invasores.

Para que los leucocitos puedan viajar al tejido interesado, deben primero abandonar el torrente sanguíneo principal. De ello se encargan las células endoteliales que detectan un problema en sus cercanías. Reacciones adhesivas que suelen implicar a las selectinas, no a las integrinas, hacen que los leucocitos reduzcan su velocidad y se desplacen por la capa endotelial de los vasos sanguíneos. A continuación, las señales procedentes del interior instan a que ciertas integrinas de los leucocitos (principalmente las que contienen subunidades de tipo β1 o β2) adquieran afinidad por las moléculas de la familia de las inmunoglobulinas, en especial las ICAM (moléculas de adhesión intercelular), presentes en las células endoteliales. En virtud de esas interacciones, los leucocitos se detienen, se abren paso entre las células endoteliales y atraviesan la pared de los vasos sanguíneos en el tejido dañado o infectado.

La importancia de las integrinas en las inflamaciones se pone de manifiesto en la deficiencia de adhesión leucocitaria. Los individuos que padecen esta enfermedad carecen de la subunidad β2 de la integrina o sintetizan una versión defectuosa. Puesto que sus leucocitos no pueden llegar a los sitios dañados, esas personas suelen sufrir infecciones que amenazan su vida.





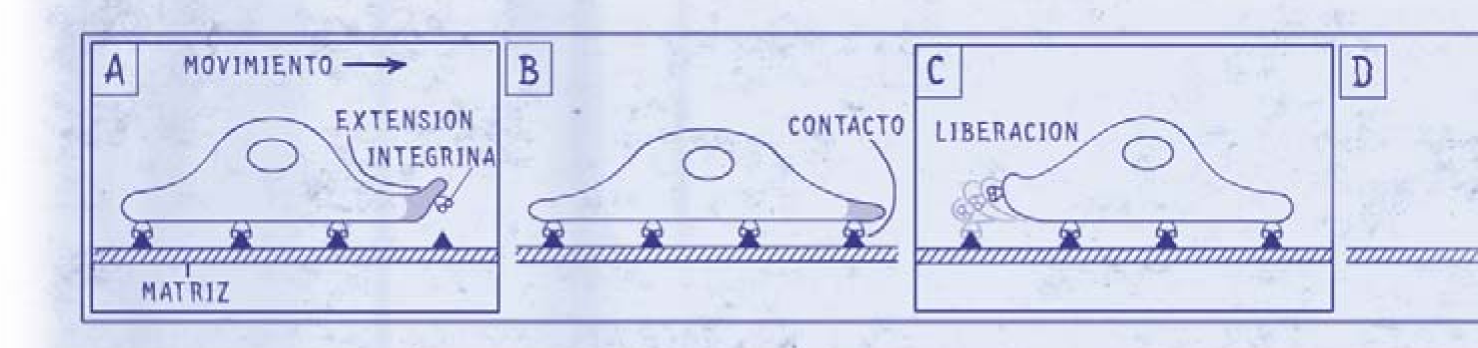
6. RETINA de un ojo normal (*izquierda*) alimentada por vasos sanguíneos intactos y retina de un diabético con retinopatía proliferativa (*derecha*), con abundantes vasos sanguíneos anormales que pueden dañarla y causar ceguera. El desarrollo de nuevos vasos requiere un despliegue copioso de integrinas αvβ3 por parte de las células endoteliales. Esta integrina es una de las que actualmente centran la atención de los laboratorios farmacéuticos.

La respuesta inflamatoria protege de infecciones graves al cuerpo. Pero puede contribuir a una enfermedad si persiste durante demasiado tiempo o se produce de forma inadecuada. Para mejorar el tratamiento de los casos en los que se sufren inflamaciones crónicas, se están desarrollando compuestos (dirigidos contra las integrinas α4β1 y β2) que impiden las interacciones, mediadas por integrinas, entre leucocitos y células endoteliales. Esos fármacos se hallan en fase de prueba en pacientes asmáticos, con inflamaciones del aparato digestivo y artritis reumatoide.

Las inflamaciones pueden ser también muy destructivas durante la reperfusión; así se llama el proceso de restauración de flujo sanguíneo a los tejidos que han quedado desprovistos de sangre durante, por ejemplo, un episodio de congelación, un ataque al corazón o un accidente cerebrovascular. (Muchos ataques al corazón y accidentes cerebrovasculares se deben a la oclusión de algún vaso sanguíneo importante que abastece el corazón o el cerebro.) La pérdida transitoria de sangre puede dañar o destruir el tejido. Cuando se restablece el flujo sanguíneo, los neutrófilos de la sangre detectan el daño, emigran a las zonas afectadas y liberan oxidantes.

Los oxidantes pueden destruir a los patógenos, pero pueden también causarles más daños a las ya frágiles células. Los investigadores intentan frenar la agresión debida a la reperfusión con fármacos cuyas dianas son las integrinas β2 de los neutrófilos o las ICAM de las células endoteliales. Separando las integrinas de las ICAM, los fármacos impedirían que los neutrófilos salieran del torrente sanguíneo para invadir el tejido sometido a reperfusión.

Igual que sucede con las inflamaciones, un exceso o un defecto en la formación de trombos resultan peligrosos. Las personas que carecen de integrina αIIbβ3 (de suma importancia para la agregación plaquetaria) padecen trombastenia de Glanzmann. Las plaquetas no se agregan correctamente y las víctimas corren riesgo de desangrarse. En el otro extremo del espectro, un desarrollo excesivo



Integrinas que se consideran potenciales dianas de fármacos

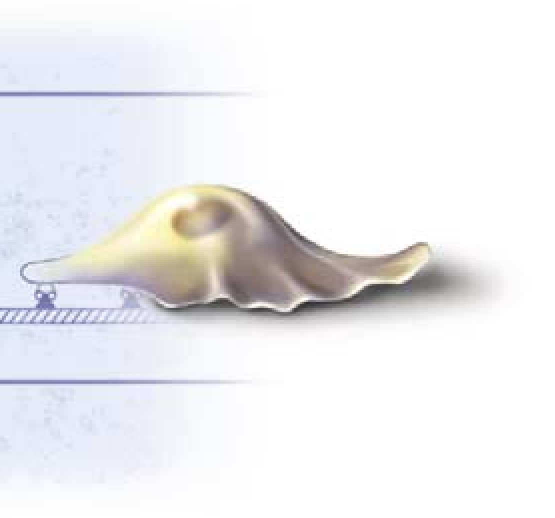
Las integrinas intervienen en diversas enfermedades. La industria farmacéutica está preparando drogas cuyo objetivo es impedir que algunas, las indicadas en esta tabla, se adhieran a sus lugares habituales en el cuerpo.

Integrina	Tipos celulares que presentan integrinas	Moléculas a las que se unen	Ejemplos de enfermedades relacionadas con la adhesión de integrinas
αIIbβ3	Plaquetas	Fibrinógeno, factor de von Willebrand, otros	Formación masiva de trombos y posterior obstrucción de los vasos sanguíneos (restenosis) tras una angioplastia, realizada para limpiar las arterias obstruidas
αvβ3	Células endoteliales	Fibronectina, vitronectina, otras	Angiogénesis que contribuye a la progresión tumoral y retinopatía diabética
	Células de la musculatura lisa	Las mismas de arriba	Restenosis
α4β1	Leucocitos diversos	Fibronectina, VCAM-1	Enfermedades inflamatorias crónicas, como el asma y la artritis
Integrinas β2	Neutrófilos	ICAM	Agresiones debidas a la reperfusión
	Leucocitos diversos	Las mismas de arriba	Enfermedades inflamatorias crónicas

de los trombos, algo que suele ocurrir cuando hay una acumulación de depósitos grasos (placas ateroscleróticas) en los vasos sanguíneos, puede ocasionar un ataque al corazón o un accidente cerebrovascular si el trombo acaba obstruyendo el vaso.

Existen procedimientos angioplásticos para desatascar las arterias ateroscleróticas. Pero tales medidas pueden interesar las células endoteliales y hacer que ocasionalmente se formen trombos en las arterias al día siguiente del tratamiento. Además, en el proceso de restenosis, los vasos sanguíneos de muchos pacientes pueden resultar obstruidos nuevamente en un período de muchos meses, debido en este caso a la emigración y proliferación de las células del músculo liso. Según parece, este proceso se produce en respuesta a determinadas sustancias presentes en los trombos que se forman cerca de los sitios dañados. Para impedir la aparición de trombos en los días posteriores al tratamiento, se emplean fármacos que impiden, transitoriamente, que la integrina αIIbβ3 interaccione con el fibrinógeno. Por demorar la formación de trombos, ese tipo de fármacos podría colaborar, además, en el control de la restenosis.

En principio, la restenosis se evitaría actuando contra una integrina diferente, la αvβ3, que abunda en las células de la musculatura lisa cuando se lesionan los vasos sanguíneos. Puesto que se trata de una integrina que promueve, así parece, la supervivencia y el movimiento de esas células, el bloqueo de su actividad podría limitar la participación de las células a la restenosis.



7. LAS CELULAS VIAJAN de un sitio a otro, creando y deshaciendo puntos de unión con una matriz, con la ayuda de integrinas. Después de trabarse en una matriz, producen una suerte de pseudópodos (*a*) con los cuales establecen nuevos anclajes en su parte frontal (*b*). A continuación, se liberan de las conexiones de la parte posterior (*c*), lo que permite que este extremo avance. El ciclo comienza de nuevo (*d*).

Entre los trastornos en los que se detecta una actividad de las integrinas indeseable recordaremos la osteoporosis, un número cada vez mayor de enfermedades infecciosas y el cáncer. La osteoporosis se caracteriza por la pérdida de tejido óseo y el consiguiente incremento del riesgo de fracturas, principalmente en las mujeres de edad madura. Este tipo de problemas puede obedecer a la hiperactividad de células que se unen al tejido óseo y lo degradan. El engarce en cuestión viene mediado por la integrina αvβ3; y ése es el motivo de que se esté ensayando el empleo de señuelos, que esconden la integrina, para impedir que las células destructivas se adhieran al tejido óseo.

En el caso de infecciones, parece ser que ciertos microorganismos entran en las células sirviéndose de las integrinas. Procederían así los agentes de la gripe, meningitis, diarreas y parálisis. Ante tales hallazgos, se habla de la posibilidad de diseñar nuevos fármacos contra las integrinas implicadas en esos procesos.

Aunque no cabe la menor duda de que las integrinas participan también en el cáncer, queda mucho por averiguar sobre el mecanismo responsable. Aparece cáncer cuando las células se saltan los controles normales sobre la división y movimiento celular; las células se multiplican entonces sin freno y adquieren la capacidad de invadir tejidos y metastizar, esto es, propagarse a sitios distantes y desarrollarse en regiones que no les son propias. Se ha observado que, en ciertos tumores, la producción de integrinas específicas se ha detenido, no son éstas las de esperar o su distribución normal se encuentra alterada. Las consecuencias de esos cambios no son siempre manifiestas, aunque se supone que algunas integrinas facilitan la emigración de células que de suyo no se moverían.

Las integrinas promueven la formación de vasos sanguíneos (angiogénesis) en los tumores. Esos vasos nutren a los tumores y proporcionan a las células metastásicas vías de acceso a la circulación. Para crear nuevos vasos sanguíneos, las células endoteliales en proliferación deben formar uniones adhesivas unas con otras y con la matriz circundante. Existen pruebas de la presencia de grandes cantidades de integrina $\alpha v\beta 3$ en las células endoteliales que están formando nuevos vasos, presencia que evita la muerte de las células proliferantes. A este respecto, los compuestos que arruinan la adhesión de las células endoteliales mediada por integrina $\alpha v\beta 3$ inducen la autoaniquilación de las células endoteliales que proliferan de una manera indebida. Se trata de agentes que inhiben, además, la formación de nuevos vasos y producen la regresión de tumores en animales, por la presumible razón de que cortan el suministro de sangre a los tumores.

Espoleados por tales resultados, los expertos se aprestan a investigar la eficacia anticancerígena de los inhibidores de $\alpha v\beta 3$. Esos agentes u otros del mismo tenor pueden acudir en auxilio de las personas que padecen retinopatía proliferativa, una de las complicaciones derivadas de la diabetes. En este trastorno se produce una proliferación de vasos sanguíneos anormales, que daña la retina y causa ceguera. Los fármacos en cuestión no deben afectar a los vasos sanguíneos sanos, ya que la integrina $\alpha v\beta 3$ no abunda en las células endoteliales de los vasos que no están desarrollándose.

La mayoría de las posibles terapias contra enfermedades vinculadas con la adhesión se proponen impedir el engarce de las integrinas con las moléculas extracelulares. Pero a su vez, los agentes que favorecen esos anclajes podrían facilitar el movimiento de células dérmicas sanas hacia zonas de la piel dañadas gravemente, acelerando de esa manera la curación de las heridas. Productos similares podrían incorporarse en matrices artificiales, para guiar el desarrollo de nuevos tejidos que sustituyan a los dañados por enfermedades, tratamientos agresivos o lesiones de cualquier tipo.

A la mayoría de los que nos venimos dedicando al estudio de las integrinas nos interesan, sobre todo, los aspectos básicos de la investigación: averiguar los mecanismos en virtud de los cuales las integrinas y otras moléculas de adhesión gobiernan el desarrollo y la fisiología. Independientemente de nuestra óptica de partida, la experiencia científica está resultando apasionante. Lo que en un principio fue estudio de un aspecto de un problema ceñido ha terminado por llevarnos al inmenso campo de los efectos producidos por las integrinas y otras moléculas de adhesión. Los progresos obtenidos ponen una vez más de manifiesto la importancia de la cooperación entre las diferentes áreas de la ciencia.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

INTEGRINS: VERSATILITY, MODULATION, AND SIGNALING. R. O. Hynes en *Cell*, vol. 69, n.º 1, páginas 11-25; 3 de abril, 1992.

TRAFFIC SIGNALS FOR LYMPHOCYTE RECIRCULATION AND LEUKOCYTE EMIGRATION: THE MULTISTEP PARADIGM. T. A. Springer en *Cell*, vol. 76, n.º 2, págs. 301-314; 28 de enero, 1994.

INTEGRINS: EMERGING PARADIGMS OF SIGNAL TRANSDUCTION. M. A. Schwartz, M. D. Schaller y M. H. Ginsberg en *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, vol. 11, págs. 549-599; 1995.

CELL MIGRATION: A PHYSICALLY INTEGRATED MOLECULAR PROCESS. D. A. Lauffenburger y A. F. Horwitz en *Cell*, vol. 84, n.º 3, págs. 359-369; 9 de febrero, 1996.

THE EXTRACELLULAR MATRIX IN EPITHELIAL BIOLOGY: SHARED MOLECULES AND COMMON THEMES IN DISTANT PHYLA. J. Ashkenas, J. Muschler y M. J. Bissell en *Developmental Biology*, vol. 180, n.º 2, páginas 433-444; 15 de diciembre, 1996.

Glenn Zorpette

ALAN COCCONI: La imaginación del ingeniero

Cae la tarde, luminosa y despejada, del febrero californiano. Parece más límpida desde el cristal de un deportivo eléctrico. A mi izquierda, los montes de San Gabriel; a mi derecha, Alan Cocconi, en el asiento del pasajero. Cocconi, creador de la máquina, me azuza. Vamos ya a más de 150 kilómetros por hora.

Este reputado ingeniero es un genio de la electrónica de potencia. Pero no le verán atareado entre miliwatts y microtransistores. Lo suyo es el diseño de circuitos en los que decenas de kilowatts fluyen a través de transistores del tamaño de un botón de abrigo. Y no tiene quien le haga sombra, al menos en los Estados Unidos, insisten los del gremio. “Apenas si puedo seguirle”, confiesa Wally E. Rippel, otro ingeniero que trabaja en la prestigiosa firma consultora AeroVironment y fue físico de plantilla en el Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena (California).

Como es habitual en el campo de la ingeniería, a él se le conoce menos que a las creaciones que han saltado a la palestra (a veces literalmente) gracias a sus circuitos. Una de ellas fue un pterosauro gigante, que batía las alas, la estrella de la película *On the Wing*. Otra fue el SunRaycer, presentado por General Motors y ganador, en 1987, de una carrera a través de Australia para coches propulsados por energía solar, que hizo época.

Estos proyectos fueron meros ejercicios de entrenamiento para el trabajo de Cocconi en el Impact, el airoso prototipo de vehículo eléctrico que GM presentó en 1990 en medio de un gran revuelo propagandístico. Los circuitos de Cocconi convertían la corriente continua de las baterías del vehículo en la corriente alterna que movía el motor; también convertía la corriente alterna en continua a fin de recargar las baterías. Si consideramos el estado de la técnica en las postrimerías de los años ochenta con la que tuvo que trabajar, habrá que reconocer que ese circuito, llamado inversor, constituyó una obra maestra de ingeniería.

Con unas pocas —pero significativas— modificaciones eléctricas, el Impact se transformó en el EV1, que GM ha sacado ya al mercado. Cocconi, que no estaba de acuerdo con la mayoría de las modificaciones, había abandonado con anterioridad el proyecto, por participar en el cual recibía pingües honorarios. El portazo, dado en 1991, es expresión de su carácter. Se le tilda de solitario, incapaz de trabajar en equipo y refractario a sugerencias que no gocen de su consideración más elevada.

Cocconi dirige ahora su propia compañía, AC Propulsion, con sede en una pequeña y atestada nave de una zona industrial anodina, en San Dimas (California). Con siete empleados, se gana la vida transformando automóviles de gasolina en eléctricos. Según me cuenta, uno de sus Honda Civic reconvertidos (modelo de 1993, sin ningún refinamiento de líneas) supera al estilizado EV1 de GM —de esmerado diseño— tanto en autonomía como en el tiempo requerido para recargar las baterías. AC Propulsion cobra entre 10 y 14 millones de pesetas por la reconversión; hasta la fecha ha llevado a cabo 11, y ha vendido 45 grupos motrices eléctricos a particulares que se los montan ellos mismos. La compañía, dice Cocconi, obtiene beneficios, “si no nos ponemos un sueldo demasiado elevado”. Ultimamente, en su tiempo libre y con 200.000 dólares de su bolsillo, Cocconi ha construido un deportivo llamativo y chillón, llamado Tzero, que espera vender pronto. El Tzero era el bólido rojo que conducía yo por el asfalto de California aquella tarde apacible.



Alan Cocconi, genio de la electrónica de potencia

Cocconi, hijo de un matrimonio de físicos italianos, lleva la invención en los genes. Su padre, Giuseppe, estudió con Enrico Fermi en Roma y enseñó en la Universidad de Cornell. En 1959 escribió un famoso artículo con Philip Morrison, en el que proponían usar el espectro de emisión del hidrógeno para buscar vida inteligente extraterrestre. “Suerte que hice algo diferente, y no tengo que competir con él”, dice Cocconi de su padre. “Yo no entiendo su física, y él no entiende mi electrónica.”

En 1962, cuando contaba cuatro años, sus padres se trasladaron al CERN, el centro europeo de investigación nuclear, en las inmediaciones de Ginebra. Allí se aficionó a la construcción de modelos de aviones radiocontrolados, pero no —como hace la mayoría— montando maquetas ya preparadas, sino

partiendo de cero. Terminada la segunda enseñanza, le aceptaron en el Instituto de Tecnología de California, y ahí llegó, a Los Angeles, a finales del verano de 1976, con una caja forrada de espuma, grande como un ataúd, que contenía sus preciosos aviones. En el Caltech, se concentró en la electrónica. "Mi motivación era simple y no del todo noble", dice. "Quería construir mejores maquetas de aviones." Más tarde se dio cuenta de que en la electrónica, por oposición a la aeronáutica, le sería más fácil evitar trabajar para los militares.

Este razonamiento es recurrente en Cocconi; le pregunto si es antimilitarista, y tras pensarlo un momento replica que lo es "razonablemente". "La verdad es que no quiero contribuir activamente a esa tarea." Se encoge de hombros. "Supongo que el haberme criado en Suiza me ha dejado una manera de ver las cosas un poco diferente."

Tras la universidad, trabajó durante un par de años diseñando circuitos electrónicos de potencia para una pequeña compañía llamada Teslaco; fue el único período de su vida que pasó como empleado. Ahorró 7000 dólares y se despidió. Había decidido dedicarse por entero a diseñar y construir aviones pilotados por control remoto. "Mis padres estaban preocupados", recuerda. "Dos años después de la universidad, dejé mi trabajo sin la perspectiva de otro."

Trabajando solo en su pequeño apartamento de Pasadena, Cocconi diseñó superficies alares, fuselajes, electrónica de control e incluso antenas, y construyó pequeñas joyas aeronáuticas en fibra de vidrio, espuma y fibra de carbono. Instaló cámaras de vídeo e hizo volar los aviones a gran altura sobre las cuencas desecadas de los lagos del desierto de Mojave, tomando primeros planos de cumbres nevadas. Al cabo de un año, un amigo que trabajaba en el negocio de los aviones a control remoto le presentó a un ingeniero de la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio (NASA). El ingeniero se quedó tan impresionado por uno de los aviones de Cocconi, que le ofreció un contrato para que construyera un modelo para investigaciones aerodinámicas.

Cocconi contactó más tarde con un conocido, Alec Brooks, de AeroVironment, y la compañía pronto le contrató para realizar algunos trabajos. En 1984 la Institución Smithsoniana y la compañía Johnson Wax se pusieron de acuerdo para financiar *On the Wing*, cuyo guión exigía un pterosauro mecánico que volara. AeroVironment, que fue contratada para construir la bestia, recabó a su vez la colaboración de Cocconi para crear los circuitos que movieran las alas y guiaran y estabilizaran el artefacto en el aire.

La tarea era delicada. La mayoría de los aparatos que vuelan son estables en todos sus ejes, mientras que el robot de pterosauro era inestable tanto al cabeceo como a la guiñada. El pterosauro surcó los aires en el momento álgido de la película, pero más tarde se estrelló en un festival militar aéreo. El recuerdo aún le divierte. "Salieron artículos sobre los dólares que paga el contribuyente y que se pierden construyendo pterodáctilos que se estrellan", dice entre carcajadas.



Deportivo eléctrico: el "Tzero" excitará, sin dejar un sentimiento de culpabilidad, a los ecologistas acaudalados

A través de AeroVironment, Cocconi consiguió los contratos para trabajar en los vehículos SunRaycer e Impact. Estos trabajos le proporcionaron la experiencia —y el dinero— para lanzar AC Propulsion. Aparte de reconvertir coches de gasolina en eléctricos y de construir el deportivo rojo, Cocconi ha construido un pequeño remolque que contiene un motor de explosión ligero con el que cualquiera de sus coches eléctricos se convierte en un vehículo híbrido capaz de rodar fácilmente a las velocidades típicas de las autopistas con plena autonomía.

Cocconi ha atravesado por dos veces los Estados Unidos conduciendo su coche híbrido con el remolque, una de ellas en septiembre de 1995 de camino a la reunión de la Asociación para una Nueva Generación de Vehículos (*Partnership for a New Vehicle Generation*, o PNGV), en Washington. El objetivo de este consorcio, formado gracias al apoyo del vicepresidente Al Gore, consiste en desarrollar técnicas automovilísticas de vanguardia, entre ellos los híbridos.

En la reunión de Washington, Cocconi se quedó "bastante desanimado por lo que estaba oyendo". A la vez que reconoce que su combinación de coche y remolque puede que no fuera precisamente la configuración que entrara en los planes a largo plazo de la PNGV, sostiene que su vehículo reúne todas las restantes especificaciones de la PGNV para los híbridos. A pesar de todo, los representantes de Gore en la reunión le ignoraron.

"Su táctica consiste en darles dinero a los fabricantes de automóviles y justificar ese dispendio, en vez de intentar sacar a la calle un coche que ruede", declara. Esa mentalidad, en su opinión, tuvo la culpa de lo que considera el mayor error del EV1 de General Motors: el coche monta un recargador inductivo, en lugar del conductivo por el que Cocconi abogaba.

GM afirma que ese sistema es más seguro, pero Cocconi no está de acuerdo, y replica que la elección de la compañía en favor del recargador inductivo "actuó como una esponja que absorbió los fondos estatales y federales que podrían haber sido destinados a crear una infraestructura mucho más barata y extendida" para los vehículos eléctricos.

Por la noche, subimos a uno de los Honda reconvertidos para dar una vuelta. Convencido de que cuanta más información, mejor, Cocconi ha alineado en el salpicadero una generosa colección de indicadores y diales, a cuyo resplandor ámbar el inventor adquiere un aire beatífico. Bajo su desordenado pelo oscuro, su amplia sonrisa revela la dicha inefable del creador.

Astrofísica fractal

Nubes de gas

Las estructuras fractales, se reconoce hoy, abundan en la naturaleza. En el universo, las nubes de gas que componen el medio interestelar tienen estructura fractal. El desconocimiento del origen exacto de ésta había provocado la aparición de diversas hipótesis y modelos fundados, sobre todo, en la turbulencia. Nosotros acabamos de demostrar que la mutua atracción gravitatoria entre los átomos de las nubes permite explicar la estructura fractal observada.

El medio interestelar es un conjunto de nubes de gas y polvo compuesto principalmente de hidrógeno (atómico y molecular) y helio (un cuarto de la masa). Otros elementos están presentes en cantidades tenues (1 % de la masa). La mayor parte de la nube de gas es muy fría, con temperaturas cercanas a 3 grados kelvin; forma, además, una estructura en grupos muy fragmentada.

Merced a las observaciones radioastronómicas en las líneas de 21 centímetros del hidrógeno atómico y de 2,6 milímetros del monóxido de carbono se ha puesto de manifiesto que estas nubes evidencian una jerarquía de estructuras con masas que van desde una masa solar hasta un millón de veces dicho valor. Por su parte, los tamaños respectivos de las nubes oscilan desde 0,0001 parsecs (1 parsec $= 3 \times 10^9$ km) hasta 1000 parsecs. Las estructuras mayores son nubes moleculares gigantes o complejos de ellas, probablemente los objetos más ingentes de nuestra galaxia ligados por la gravitación.

De las observaciones astronómicas en un amplio rango de escalas y con diversas líneas espectrales se desprenden relaciones notables entre la masa, M, y el tamaño, R, de las nubes del tipo $M \sim R^{d_H}$, donde el valor de d_H se encuentra entre 1,5 y 2. Este comportamiento es típico de los fractales, bien conocidos a escala terrestre y de laboratorio. En la fórmula, d_H es la dimensión de Haussdorf, así llamada en honor del matemático Felix Haussdorf y que indica el grado de irregularidad y fragmentación del fractal. La dispersión de velocidades internas en el gas sigue una ley análoga: $\Delta v \sim R^q$ con $0,3 \leq q \leq 0,6$. El aspecto de un fractal es el mismo cualquiera que sea la escala a la que se lo observa. Las ilustraciones que se aportan manifiestan esta propiedad del medio interestelar en la constelación del Toro.

Para abordar el problema recurrimos a métodos de la teoría cuántica de campos y el grupo de renormalización. Nadie lo había intentado antes para el medio interestelar. Consideramos un gas de partículas en equilibrio térmico que interactuasen entre sí y cumplieran la ley de Newton de la gravitación. Luego, demostramos que la termodinámica de este gas está descrita exactamente por la integral funcional para un campo escalar $\phi(\vec{x})$ con una interacción no lineal bien determinada. Esta integral funcional implica sumar sobre todas las configuraciones del campo, usando un peso estadístico

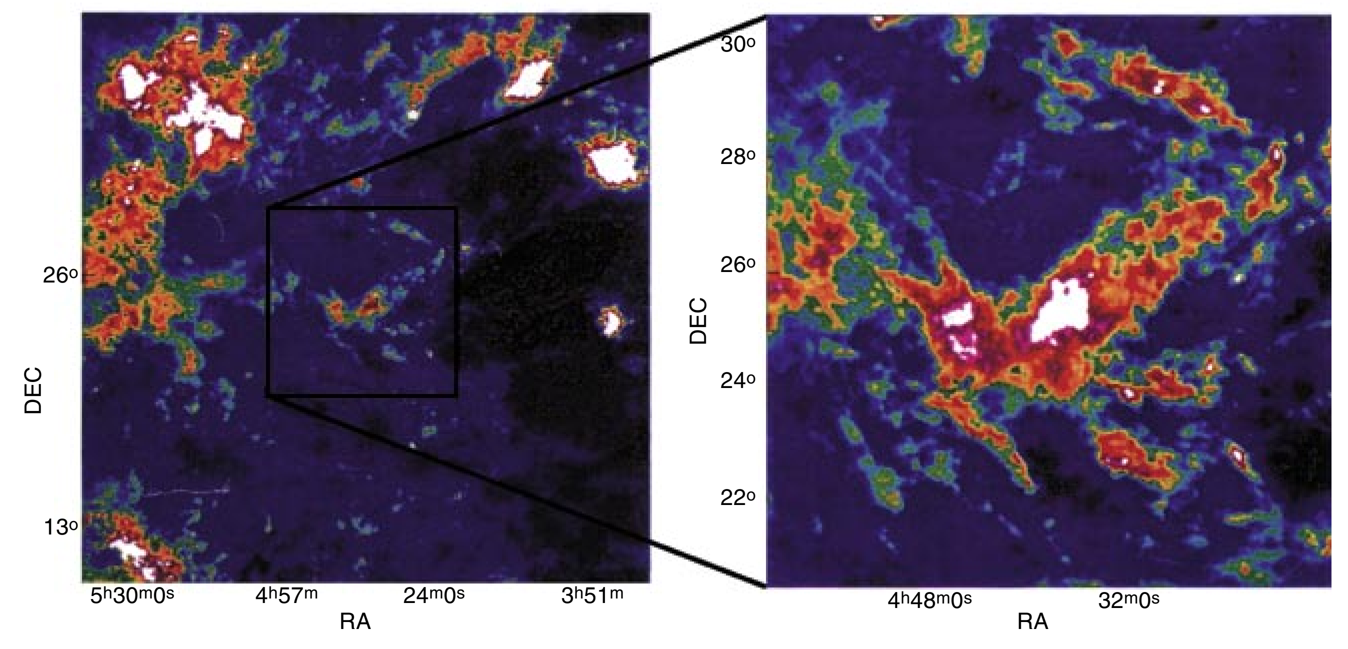


Imagen del medio interestelar en la región del Toro obtenida con el satélite IRAS. La imagen de la izquierda abarca un ángulo de 30°. A la derecha, ampliación del centro de la misma por un factor tres. Se observa que la estructura fragmentada del medio no se modifica al cambiar la escala. Esta estructura fractal ha recibido oportuna confirmación en diversas observaciones, a muy diversas escalas

que depende de la configuración. Hallamos que con dos parámetros quedaba fijada la dinámica del campo ϕ. Uno con dimensiones de longitud (d_J) y otro sin dimensiones (g). El primero determina la distancia a partir de la cual la interacción gravitatoria produce inhomogeneidades en el medio. Contrariamente a otras fuerzas, los efectos gravitatorios en un gas o en un fluido crecen con la distancia. Tal propiedad fue descubierta por el astrofísico británico James Jeans en 1902 (d_J es la llamada longitud de Jeans en el problema).

El parámetro g determina el grado de nolinealidad en la interacción del campo ϕ. En este problema g es muy pequeño, del orden de 10^{-26}, mientras $d_J \sim 5 \times 10^9$ km.

Utilizando el grupo de renormalización y los conceptos de invarianza de escala en sistemas de tamaño finito, hallamos que la masa de las nubes y su tamaño obedecen la relación expuesta más arriba. Obtenemos como valores numéricos $d_H = 2$ y $q = 1/2$.

Además, con la misma teoría logramos predecir el comportamiento de las correlaciones de densidad de materia en el interior de las nubes, así como las correlaciones del potencial gravitatorio. Nuestra predicción para las primeras es que decrecen como el inverso del cuadrado de la distancia mientras que las segundas decrecen como el inverso de la distancia.

Hay que subrayar que nuestras predicciones no dependen de ningún parámetro ajustable. Los valores de los exponentes hallados son universales en el sentido de que no dependen de la masa de las nubes, ni de los parámetros d_J y g. Análogas propiedades de universalidad aparecen en otros sistemas físicos, cerca de la transición de fase entre el gas y el líquido y en sistemas magnéticos (redes de espines). Sin embargo, en el gas autogravitante las propiedades de escala aparecen en un amplio rango de temperaturas y densidades, mientras que en las transiciones de fase la invarianza de escala sólo ocurre en la vecindad inmediata de la transición, es decir, para valores precisos de temperatura y densidad o muy próximos a ellos.

Las observaciones realizadas de d_H y q en el medio interestelar por los instrumentos pertinentes están en buen acuerdo con nuestros resultados teóricos. Además, nuestras dos predicciones para el medio interestelar (correlaciones de densidad y del potencial gravitatorio) podrán someterse, asimismo, a comparación con observaciones. Los datos actuales de funciones de correlación no son suficientes, pero en un futuro próximo se dispondrá de nuevas observaciones. El comportamiento de la función de correlación del potencial gravitatorio podrá medirse mediante el efecto de lente gravitatoria, por ejemplo, observando nubes interestelares delante de cuásares.

Hemos llegado, pues, a la conclusión de que un gas de partículas que interactúen entre sí gravitatoriamente posee notables propiedades fractales y de invarianza de escala. Esta teoría explica las observaciones astronómicas del gas interestelar y predice nuevas propiedades que podrán verificarse a través de las observaciones.

H. J. DE VEGA
Laboratorio de Física Teórica
y Altas Energías
de la Universidad de París VI
N. SÁNCHEZ Y F. COMBES
Observatorio de París, Demirm

Plasticidad sináptica

A corto plazo

El sistema nervioso nos permite percibir, pensar y recordar. Compete a los neurobiólogos descubrir los procesos a través de los cuales las células nerviosas, las neuronas, están comprometidas en estas funciones.

Para comunicarse, las neuronas generan impulsos nerviosos o potenciales de acción que se transmiten a través de su axón hasta el terminal axónico, donde provocan la liberación sináptica de neurotransmisores. Estos actúan sobre los receptores, proteínas especializadas de la membrana postsináptica de la siguiente neurona. En respuesta, la neurona receptora se excita o se inhibe, según el tipo de neurotransmisor liberado.

La eficacia con que una neurona activa o inhibe a la siguiente, es decir, la eficacia con que le transmite información, no es algo estático. Varía a tenor de la experiencia de las sinapsis. Por ejemplo, si ambas células tienden a permanecer activas, la conexión sináptica que las vincula quedará reforzada. En esta observación se funda la hipótesis de la plasticidad sináptica a largo plazo, según la cual la información se almacena en el sistema nervioso en forma de modificaciones persistentes de la eficacia de transmisión de impulsos nerviosos en sinapsis distribuidas por los circuitos neuronales. Se conocen ya muchos de los procesos celulares y moleculares implicados en la modificación bidireccional y persistente de la eficacia sináptica, pues no en balde se trata del modelo celular más investigado como posible sustrato celular de la memoria.

La eficacia sináptica puede también modificarse por cortos períodos de tiempo. Es lo que se llama fenómeno de la plasticidad sináptica a corto plazo. Dicha eficacia depende de la actividad muy reciente en las sinapsis, que regresan a su estado basal en cuestión de milisegundos o segundos. La falta de persistencia de estas modificaciones sinápticas despierta la sospecha de que tal plasticidad podría intervenir en el procesamiento de información; en efecto, los cambios sinápticos de tan exigua duración (milisegundos, por ejemplo) difícilmente pueden constituir un mecanismo mnemónico.

Los procesos de plasticidad sináptica a corto plazo podrían servir para producir las transformaciones que los circuitos neuronales operan sobre la información de entrada hasta darle salida, una vez elaborada. Podría también servir para desencadenar los mecanismos involucrados en el almacenamiento a largo plazo de la información procesada.

Un ejemplo básico de plasticidad a corto plazo en un circuito neuronal se nos ofrece en la transmisión sináptica cuando se envían dos señales a través de un axón con un intervalo temporal breve entre una y otra. La eficacia sináptica de la segunda señal puede variar en razón del intervalo que la separa de la primera: puede ser igual, menor (en un fenómeno conocido como depresión por pares de pulsos) o superior (en un fenómeno de facilitación por pares de pulsos).

La facilitación por pares de pulsos suele darse cuando, entre la primera señal y la segunda, media sólo de 20 a 100 milisegundos, con un máximo alrededor de los 50 milisegundos. Se trata de un proceso ampliamente investigado. Así, sabemos que, en un circuito elemental constituido por dos neuronas, los mecanismos celulares involucrados implican un proceso presináptico que consiste en un aumento de la probabilidad de liberación de neurotransmisor ante la segunda señal debido al calcio que queda remanente de la liberación producida por la primera señal. Dicho de otro modo, la

liberación de neurotransmisor es un proceso estocástico que depende de la entrada de calcio en el terminal presináptico.

La existencia del proceso de facilitación en una sinapsis está vinculada a la probabilidad de liberación del neurotransmisor. Si la probabilidad es alta, la mayor parte del neurotransmisor disponible se liberará en la primera señal, esto es, provocará el fenómeno de la depresión ante la segunda señal hasta el momento en que haya disponible nuevo neurotransmisor; si la probabilidad de liberación de neurotransmisor es baja, la entrada de neurotransmisor aumentará durante la segunda señal debido al calcio remanente de la primera señal, produciendo una mayor respuesta sináptica. En circuitos complejos la facilitación y depresión por pares de pulsos puede verse afectada por múltiples factores; pensemos, por ejemplo, en receptores presinápticos y postsinápticos dependientes de voltaje.

En un trabajo reciente hemos investigado otra forma de plasticidad sináptica a corto plazo, que ocurre en un circuito de conexión entre el tálamo y la corteza cerebral. Las conexiones talamocorticales proveen la única vía que la información procedente del mundo exterior tiene para acceder a la corteza, la estructura más evolucionada de nuestro cerebro.

La corteza cerebral se organiza en láminas de neuronas que forman diferentes capas. Hemos observado que la plasticidad sináptica a corto plazo de las conexiones talamocorticales depende de la capa cortical hacia la que proyectan. Así, cuando se envían dos señales separadas por un intervalo temporal entre 50 y 200 milisegundos, las conexiones que proyectan a la capa V producen un aumento de la eficacia sináptica; lo llamamos "respuesta reforzada" para distinguirla del proceso de facilitación descrito previamente. Por contra, las conexiones que proyectan a la capa IV dan lugar a depresión por pares de pulsos.

En una serie de artículos recientes hemos descrito los procesos celulares involucrados en la generación de la respuesta reforzada de las proyecciones a la capa V. La primera señal enviada activa células postsinápticas dispares, unas excitadoras y otras inhibidoras, que a su vez están recurrentemente conectadas, en el sentido de que las inhibidoras desactivan a las neuronas excitadoras. Esta inhibición resulta decisiva en la generación de la respuesta reforzada, ya que va a producir la liberación de unas corrientes de membrana que incrementan la excitabilidad de las células excitadoras durante la segunda señal, dando lugar a una respuesta aumentada.

Por tanto, a diferencia de lo que ocurre con la facilitación por pares de pulsos, la respuesta reforzada depende de un proceso postsináptico que consiste en un aumento de la excitabilidad de una población de células de la corteza. Lo más interesante de este proceso de plasticidad a corto plazo estriba en que varía con el estado de alerta del sujeto. Cuando el sujeto se halla en un estado pasivo, carente de actividad motora y atención, se puede provocar la respuesta reforzada; cuando el sujeto está activo y explorando el ambiente o realizando alguna tarea que requiere su atención (por ejemplo, procesando información), la respuesta reforzada permanece inactiva. Esto sugiere que los mecanismos celulares involucrados en la generación de la respuesta reforzada intervienen en la determinación del estado atencional del sujeto, de modo que la capacidad de procesamiento de información dependerá del estado en que se encuentre este tipo de plasticidad a corto plazo.

Facilitación y depresión por pares de pulsos. La figura muestra dos ejemplos de plasticidad sináptica a corto plazo. La actividad en el axón presináptico (azul), *consistente en dos señales separadas por 50 milisegundos, produce dos respuestas en la neurona postsináptica* (rojo), *cada una de las cuales refleja la eficacia sináptica entre ambas neuronas. Esta fuerza de conexión, o eficacia sináptica, varía a tenor de las sinapsis, y así puede inducir facilitación (la respuesta ante la segunda señal es mayor que ante la primera) o depresión (la respuesta ante la segunda señal es menor que ante la primera). Este tipo de procesos se denominan plasticidad sináptica a corto plazo debido a que, si el intervalo entre ambas señales fuese mayor (5 segundos, por ejemplo), la respuesta ante la segunda señal sería igual a la primera*

MANUEL A. CASTRO-ALAMANCOS
Departamento de Neurociencias
Universidad Brown

Biodiversidad

¿Cómo cuantificarla?

¿Cuántas especies existen? He aquí una de las grandes cuestiones que la biología tiene pendiente. Llevamos más de dos siglos confeccionando el catálogo de animales, plantas y microorganismos de todo tipo, y todavía no podemos dar una cifra aproximada de la cantidad de especies que componen la biosfera. Los cálculos oscilan entre cinco y un centenar largo de millones. La aproximación se mueve, pues, en un rango de desconocimiento de dos órdenes de magnitud. Todo indica, además, que la respuesta se halla muy lejos.

La necesidad de respetar los procesos naturales ha sido un factor determinante en la elaboración de la noción de biodiversidad. Por tal se entiende la cifra de especies distintas que medran en el interior de unos límites arbitrariamente determinados. Este indicador reviste particular interés y depende de la variedad de ecosistemas donde puedan habitar las distintas especies; tiene que ver también con la riqueza o acervo génico que portan las poblaciones de estas especies para enfrentarse a cambios ambientales. Así entendida, la biodiversidad es una herramienta valiosa para la ordenación del territorio y la conservación del patrimonio natural, siempre que tome en consideración el origen de las especies halladas.

La proporción de especies que ya se han catalogado sirve de parámetro crítico para estimar la biodiversidad global y para diseñar estrategias óptimas de conservación. Pero no es tarea sencilla establecer el número de especies registradas. Carecemos de un catálogo fiable. Piénsese, por ejemplo, que una fracción desconocida de las descripciones publicadas se refiere a especies "redescubiertas". Semejante redundancia sólo puede detectarse a través de las revisiones taxonómicas. La revisión de la biodiversidad ya catalogada exige un esfuerzo no menor que la descripción de todas las especies aún desconocidas.

¿Habría alguna manera de evitar el camino largo y tedioso de los estudios taxonómicos? En principio, podríamos idear un método sencillo que permitiera extrapolar los resultados de revisiones de grupos al conjunto de los seres vivos: el porcentaje de especies descritas que, por ser sinónimas de otras, debiera descartarse podría considerarse aproximadamente constante, y bastaría estimarlo en una muestra pequeña del conjunto de especies. Pero este atajo choca contra dos escollos: por una parte, la complejidad estadística involucrada; por otra, la cuestionable representatividad de los grupos escogidos. Esta segunda objeción se alza como un obstáculo insalvable.



Las náyades (bivalvos unionoides) forman un grupo que ha experimentado una amplia diversificación en la cuenca mediterránea. Los ejemplares representados aquí pertenecen a cuatro especies y proceden del curso inferior del río Ebro, donde se localizan las últimas poblaciones de algunas de ellas. Se describieron muchas especies utilizando criterios con los que probablemente ningún biólogo contemporáneo estaría de acuerdo: hace cien años era una práctica frecuente dar nombre de especie a todas y cada una de las variaciones individuales que se consideraran diagnosticables. Ya en este siglo, el número de especies aceptadas en la región mediterránea ha ido disminuyendo progresivamente, hasta llegar a sólo 7 "especies" muy variables (excluyendo las que viven en el Nilo). Cada una de éstas se hallaría asociada a una larga lista de sinónimos. Pero abundan las pruebas de que se trata de una agrupación excesiva. Los moluscos son posiblemente el grupo taxonómico más afectado por el problema de los sinónimos

La fracción de sinónimos puede tener valores muy dispares según los grupos taxonómicos, ya que la frecuencia de nombres redundantes acostumbra venir determinada por el interés que se haya puesto en estudiarlos. Así, cabe esperar largas listas de sinónimos, por ejemplo, en vegetales superiores e insectos de cierto tamaño, fáciles de recolectar y cazar, con áreas de distribución amplias y que presenten variaciones individuales evidentes. Escasearán, sin embargo, los sinónimos en especies de talla pequeña, de apariencia externa poco llamativa, de distribución restringida y difíciles de encontrar. Según parece, la cantidad de sinónimos depende de los cambios de criterio en la definición de especie y de las mejoras en las técnicas analíticas, pero nunca de un error predecible y continuo por parte de los taxónomos.

Las estimaciones de la biodiversidad global no deberían basarse en el número de especies descritas. Este parámetro continúa siendo desconocido dentro de márgenes demasiado amplios como para proporcionar un cálculo del total de especies vivientes. Es evidente que se necesitan más revisiones taxonómicas, elaboradas correctamente y puestas al día. Sin embargo, sería poco razonable pedirle al menguante número de taxónomos expertos mayor rendimiento en su penosa tarea. Dado que el problema de evaluar la magnitud y la distribución de la biodiversidad se extiende hacia la ecología y la biogeografía, es mejor atacarlo desde estos campos.

CRISTIAN R. ALTABA
Instituto Mediterráneo
de Estudios Avanzados (CSIC-UIB)

Mejora vegetal

Resistencia a la sequía

El clima adverso, las prácticas de cultivo inadecuadas y el impacto demográfico sobre el medio se cuentan entre las causas de la creciente desertización de amplias áreas de interés agronómico. El aumento de la población mundial y su hacinamiento en zonas áridas o de escasa infraestructura agroalimentaria plantea la necesidad de una solidaria distribución de los excedentes agrícolas y de los recursos hídricos. Hay que seguir insistiendo, por supuesto, en el desarrollo y optimización de suelos y sistemas de irrigación. Ahora bien, puesto que las técnicas para combatir la sequía acostumbran resultar costosísimas y el agua constituye el mayor factor limitante en la productividad de las plantas de cultivo, parece aconsejable buscar soluciones alternativas a las estrictamente técnicas, como mejorar la resistencia a la sequía de las especies vegetales de interés.

La selección de especies agrícolas que toleren mejor el estrés ocasionado por las condiciones climáticas adversas es una práctica tan antigua como la humanidad. Sin embargo, la mejora vegetal no se asoció con la genética hasta el redescubrimiento de las observaciones de Gregor Mendel a principios de siglo. Con la mejora genética clásica, la moderna bioingeniería molecular permite un avance cualitativo en las perspectivas de mejora de especies cultivadas.

Cuando la tendencia a perder agua supera su aporte por el suelo, las plantas evitan la deshidratación, completando antes sus ciclos vitales, o bien la toleran mediante diversos mecanismos: aumento de la razón entre raíz y tallo, orientación paraheliotrópica y disminución del área de las hojas, desarrollo en profundidad de las raíces, cierre de estomas y ajuste osmótico. La adaptación celular al estrés osmótico (osmorregulación) es un proceso biológico fundamental que protege a los organismos contra el efecto letal de la deshidratación.

Los primeros estudios sobre estrés osmótico en plantas fueron necesariamente descriptivos. Pero han servido para identificar diversas familias de genes, algunos de los cuales se expresan durante la embriogénesis. Entre éstos los hay inducidos por la hormona vegetal ácido abscísico, hormona que responde al estímulo de pérdida celular de agua. Estos genes cifran proteínas homólogas a poros de membrana, a factores de transcripción homólogos a protooncogenes, a transportadores nucleares o a proteínas implicadas en la tolerancia a la salinidad.

La investigación de los mecanismos que controlan su expresión está permitiendo establecer posibles rutas reguladoras y comprender las funciones potenciales de sus productos proteicos en la tolerancia a los efectos negativos de la desecación. En esa labor trabajan ahora, entre otros, Montserrat Pagès, del Centro de Investigación y Desarrollo del CSIC en Barcelona, y Ramón Serrano, del Instituto de Biología Molecular y Celular de Plantas de la Universidad Politécnica de Valencia-CSIC; en particular están sometiendo a examen plantas transgénicas que sobreexpresan muchos de estos genes, evaluando su capacidad para resistir diversos tipos de estrés ambiental.

Otros genes, cuya expresión se ve alterada durante el estrés hídrico, determinan enzimas que participan en la biosíntesis y concentración intracelular de ciertos solutos orgánicos compatibles de bajo peso molecular (osmolitos), entre los que se encuentran polioles (manitol), aminoácidos (prolina) y azúcares (trehalosa), que protegen la integridad de membranas, liposomas y proteínas lábiles durante la deshidratación. La entrada o producción de solutos dentro de la célula retiene el agua y mantiene la turgencia y volumen celular. Contrariamente, la reducción del volumen celular por debajo de un nivel crítico ocasiona el desplome de las paredes celulares y la pérdida irreversible de la función celular. En estado anhidro, los grupos hidroxilo de algunos de estos compuestos reemplazan, así parece, al agua en la formación de puentes de hidrógeno con los grupos polares de los fosfolípidos y proteínas.



Efecto de la biosíntesis de trehalosa en la mejora a la tolerancia al estrés osmótico de plantas de tabaco. Planta control (izquierda) *y transgénica* (derecha)*, genéticamente transformada con el gen de levadura trehalosa-6-fosfato sintetasa, sometidas a 15 días de estrés hídrico*

Al ser sus rutas metabólicas relativamente simples, los osmolitos son objeto de gran interés para la ingeniería metabólica de la tolerancia al estrés. Experimentos realizados en distintos laboratorios (Hans Bohnert en la Universidad de Arizona, Desh Pal Verma en la de Ohio, Tapio Palva en la de Uppsala y el nuestro propio) han puesto de manifiesto que la biosíntesis de osmoprotectores mejora eficazmente la tolerancia al estrés osmótico en plantas cultivadas.

No obstante, en el caso particular del osmolito trehalosa, los resultados obtenidos en nuestro laboratorio respaldan la hipótesis según la cual la expresión en plantas de tabaco del gen de levadura trehalosa-6-fosfato sintetasa (aislado con anterioridad en el laboratorio de Carlos Gancedo, del Instituto de Investigaciones Biomédicas de Madrid), determina la acumulación de este disacárido en una concentración demasiado baja para pensar en un efecto osmoprotector convencional.

Aunque, la trehalosa estabiliza proteínas y membranas mejor que otros azúcares, la baja concentración acumulada en las plantas transgénicas induce a pensar, sobre la base de los cambios fenotípicos observados, que más que actuar como un soluto compatible, su biosíntesis debe afectar rutas metabólicas y hormonales que conducen a cambios de mayor alcance, pleiotrópicos, que incluyen la resistencia al estrés.

La estrategia desarrollada presenta considerables avances en el esfuerzo de conseguir una mejor tolerancia de las plantas al estrés ambiental originado por la sequía, pero debe realizarse una investigación fisiológica más amplia, antes de que la biosíntesis de osmolitos pueda generalizarse con éxito a un amplio espectro de especies de interés agronómico.

Carlos Romero, Ana Espinosa,
Mari Cruz Cutanda,
José M. Bellés, Ramón Serrano
y Francisco A. Culiáñez Macià
Instituto de Biología Molecular
y Celular de Plantas.
Univ. Politécnica de Valencia-CSIC

Dimorfismo sexual

Enanismo del macho

A la diferencia general entre el macho y la hembra de una misma especie, ya sea en razón del color, tamaño u otros, se la denomina dimorfismo sexual. En el caso del tamaño, la discrepancia ha llamado la atención los expertos desde el siglo pasado. El enanismo del macho representa un caso extremo de dimorfismo. Aunque común en algunos organismos marinos (percebes o peces de la superfamilia Ceratoidae), el enanismo del macho se manifiesta raramente entre los organismos terrestres, pero es común en algunos grupos de arañas.

Por lo general, las arañas hembra son de mayor tamaño que los machos, con pocas excepciones. En algunos casos, esta diferencia es extrema; el macho adulto alcanza tan sólo una minúscula fracción de la talla de la hembra, lo que justifica el apelativo de "machos enanos."

Aunque la distribución taxonómica del fenómeno dentro de las arañas es muy heterogénea, el enanismo de los machos se da principalmente en algunas de las arañas que tejen telas orbiculares para capturar sus presas (la clásica "telaraña geométrica", que para muchos simboliza este orden de arácnidos) o en algunas de las arañas que no tejen telas de captura, sino que "emboscan" a sus presas (generalmente insectos) cuando acuden a las flores. La estrategia es, pues, básicamente la misma: aguardar al acecho la llegada de la víctima. No todas las arañas que utilizan esta estrategia de captura tienen, sin embargo, machos enanos.



Dimorfismo sexual en Gasteracantha marmosa. *A la izquierda, la hembra; el macho, a la derecha*

Uno de los casos más estudiados de enanismo del macho es el de las arañas tropicales del género *Nephila*, dentro de la familia Tetragnathidae. En estas arañas, que construyen enormes telas orbiculares, las hembras sextuplican la talla de los machos.

Para explicar el origen y existencia del enanismo del macho en las arañas se han avanzado numerosas hipótesis. Se ha sugerido, por ejemplo, que los machos, al disminuir su tamaño en comparación con el de la hembra, reducen el riesgo de canibalismo sexual, es decir, la posibilidad de ser devorados por la hembra durante o después del cortejo y cópula.

La razón entre el tamaño del macho dividido por el tamaño de la hembra da una medida del dimorfismo sexual. Partiendo de un mismo origen, puede llegarse de diversas maneras a la misma proporción o grado de dimorfismo sexual. Si pensamos en el característico "enanismo" de los machos de *Nephila*, éste podría deberse a una disminución del tamaño de los machos, a un aumento del tamaño de las hembras o a una combinación de ambos factores. A pesar de la existencia de estos diferentes procesos alternativos, la mayoría de las hipótesis sugieren que el extremado dimorfismo sexual de tamaño que presentan muchas arañas es el resultado de cambios evolutivos en la talla de los machos.

¿Cuántas veces ha evolucionado el enanismo del macho dentro de las arañas? ¿Han sido los machos, las hembras o ambos los que han ocasionado cambios evolutivos en el grado de dimorfismo sexual? En colaboración con mis colegas Jonathan Coddington, de la Institución Smithsoniana en Washington, y Nikolaj Scharff, del Museo de Zoología de la Universidad de Copenhague, hemos abordado la base comparativa y filogenética del enanismo en las arañas.

Para ello hemos reconstruido la filogenia de una muestra de 79 géneros de arañas que representan la diversidad taxonómica del grupo de las arañas tejedoras de telas orbiculares. Orbiculariae, tal es el nombre técnico del linaje, agrupa a más de una docena de familias de arañas, que representan aproximadamente un tercio de la diversidad conocida de las arañas. (Hasta el momento se han descrito más de 34.000 especies de arañas y se estima que pueden quedar por descubrir y describir ¡hasta 136.000 más!).

Nuestra reconstrucción de la filogenia de este grupo, basada en datos morfológicos y de comportamiento y expresada en forma de árbol genealógico o cladograma, nos permite sugerir una hipótesis sobre la evolución de estos grupos de arañas, e inferir el origen del enanismo del macho.

De acuerdo con nuestros resultados, se requieren por lo menos cuatro orígenes independientes del enanismo del macho dentro de la muestra taxonómica estudiada. Al menos en siete ocasiones, linajes extremadamente dimórficos han retornado a una condición monomórfica (es decir, machos y hembras de tamaño similar). Puesto que el enanismo ha aparecido (y desaparecido) independientemente varias veces, cabe preguntarse si tales cambios ocurrieron siguiendo pautas similares. Para contestar esta pregunta hemos reconstruido por separado los cambios evolutivos de tamaño de la hembra y del macho. Esto nos permite determinar la naturaleza de los distintos orígenes y reversiones del grado de dimorfismo sexual.

No parece que los cambios de tamaño de machos y hembras hayan ido siempre acoplados. En la mayoría de las arañas tejedoras de telas orbiculares, *Nephila* incluida, el enanismo del macho parece obedecer a un incremento del tamaño de la hembra (y no a una disminución en la talla del macho); han de interpretarse, por tanto, como casos de gigantismo de la hembra, y no de enanismo del macho.

En otros casos ha habido una verdadera reducción del tamaño del macho (enanismo), acoplada con un incremento en el tamaño de la hembra. Tal aconteció en el género *Tidarren*, en el cual los machos han acelerado su desarrollo acortando el número de mudas necesarias para llegar al estado adulto, convirtiéndose en adultos antes de salir de la bolsa de huevos. El cuerpo de estos machos es tan diminuto, que han de amputarse uno de sus dos órganos copuladores para poder maniobrar y desplazarse.

Estos resultados preliminares ponen énfasis en la necesidad de estudiar la base filogenética de los cambios de tamaño para poder distinguir entre distintos procesos evolutivos que determinan el dimorfismo sexual. Lo cierto es que, en las arañas el dimorfismo sexual de tamaño ha evolucionado independientemente en varias ocasiones y de diversas maneras. Por ironía de las cosas, los individuos del género *Nephila*, que se han utilizado a menudo como modelo para estudiar el enanismo del macho, representan un claro caso de gigantismo de la hembra, no de enanismo del macho.

GUSTAVO HORMIGA
Depto. de Ciencias Biológicas,
Universidad George Washington

Agua y bosque

Los problemas de la reforestación

Uno de los conceptos más usados en hidrología es el de evapotranspiración, fenómeno en virtud del cual parte del agua vuelve a la atmósfera por evaporación directa y por transpiración de las plantas. El estudio de la influencia de los procesos evapotranspirativos en los recursos hídricos de las cuencas, en función del tipo de cubierta vegetal, constituye un tema clásico en hidrología experimental. Ya en 1956, Frank Law demostró que las pérdidas por evaporación registradas por un bosque de coníferas eran mayores que las de una cubierta herbácea. De ello infería que había que sopesar el beneficio económico que reportaba la reforestación con las pérdidas sufridas en recursos hídricos por una cuenca.

El trabajo de Law se recibió al principio con escepticismo. Creíase en su tiempo que la evapotranspiración dependía sólo de la aportación radiativa, es decir, de los aportes energéticos por radiación solar. En consecuencia, aducíase, las pérdidas de agua que experimentara por esa vía cualquier tipo de cubierta vegetal debían ser similares. Aceptando, por supuesto, que se dieran las mismas condiciones climáticas y no hubiera escasez en el suministro de agua.

Pero la investigación posterior acabó confirmando la tesis de Law y develando la falsedad de la teoría clásica. Hoy se acepta que, en una cuenca, el establecimiento de una cubierta forestal en sustitución de otra cubierta herbácea restringe la aportación hídrica que reciben los torrentes. ¿A qué se debe tal disminución del agua aportada a los torrentes en las cuencas forestadas? Para responder a esta cuestión, tenemos que analizar los mecanismos de funcionamiento de los procesos evapotranspirativos, que varían según el tipo de vegetación.

De entrada, hay que desechar, por falsa, la vieja idea de que la evapotranspiración de una cubierta vegetal tiene que ser siempre menor que la “evapotranspiración potencial”. La expresión “evapotranspiración potencial”, o “evapotranspiración de referencia”, corresponde según la normativa de la FAO a la evapotranspiración de una superficie de hierba verde, que recubre todo el suelo, de altura uniforme (8-15 cm) y con abundante suministro de agua.

Por su parte, la evapotranspiración "real" corresponde a la suma de tres factores: transpiración de las plantas, evaporación directa del agua del suelo y evaporación del agua de lluvia interceptada por la superficie vegetal. Este último término es el que señala las diferencias importantes en las pérdidas de agua hacia la atmósfera según el tipo de cubierta vegetal que tengamos. Mientras que para la hierba la evapotranspiración "real" es inferior o igual a la "evapotranspiración de referencia", en un bosque las pérdidas por transpiración, es decir, durante los períodos de buen tiempo, son inferiores o iguales a esta "evapotranspiración de referencia"; ahora bien, a estas pérdidas por transpiración hay que sumarles las pérdidas por evaporación del agua interceptada durante los períodos lluviosos. Tradicionalmente, sin embargo, se venían considerando sólo las pérdidas por transpiración, o lo que es lo mismo, las producidas durante el buen tiempo.

La razón de tal discrepancia estriba en que, en el caso de la hierba, la evapotranspiración depende directamente de la aportación radiativa en cualquier condición de tiempo, en tanto que, en el caso de la vegetación de mayor porte, se intercambia una cantidad importante de energía por advección entre la biomasa y la atmósfera; dicho de otro modo, en la vegetación arbustiva y arbórea se produce un intercambio energético que no depende de los aportes por energía radiativa sino de la energía cinética asociada al movimiento del aire.

Si analizamos el balance energético de diferentes superficies vegetales llegaremos a la conclusión de que el bosque encierra un mayor potencial evapotranspirativo que una cubierta herbácea por un doble motivo: un mayor balance radiativo y un mayor potencial para transferir vapor de agua a la atmósfera.

Vayamos con el primer factor. La diferencia en el balance radiativo se debe, por un lado, al menor albedo (relación entre la radiación solar reflejada y la recibida por una superficie) que presenta el bosque; gracias a lo cual es capaz de almacenar mayor energía de onda corta. Y, por otro lado, a que el bosque emite menos radiación de onda larga, debido a que tiene una mayor rugosidad aerodinámica; la masa boscosa genera, pues, mayores turbulencias en el aire, lo que facilita una mayor transferencia de calor sensible y, por tanto, una menor temperatura de superficie.



Reforestación espontánea por coníferas en áreas de campos abandonados en la cabecera del río Llobregat. (Foto: J. Latron)

Veamos el segundo factor: el mayor potencial que el bosque posee para transferir vapor de agua a la atmósfera. Sobre los bosques, para una misma velocidad del viento, las condiciones atmosféricas son más turbulentas que sobre la hierba y, en consecuencia, posibilitan los intercambios de calor y vapor de agua en una capa atmosférica de mayor grosor. Se dice, en consecuencia, que el bosque opone una menor resistencia aerodinámica a la evapotranspiración que la hierba.

En condiciones de buen tiempo, los árboles ejercen un mayor control del agua de que disponen para vivir. Este control, de tipo fisiológico, se debe a una mejor regulación de los estomas (poros microscópicos de las hojas para el intercambio gaseoso) y depende de las condiciones hídricas del suelo a las que se encuentran sometidos los individuos.

Este funcionamiento se modifica completamente durante un episodio lluvioso. En tales condiciones, cuando las hojas se encuentran empapadas, la resistencia fisiológica no afecta el agua interceptada por las copas. La resistencia aerodinámica, mucho menor en el bosque, desempeña entonces un papel decisivo, ya que es la única resistencia que se opone a la transferencia de vapor de agua hacia la atmósfera. Es decir, durante la lluvia o justo después de haber cesado ésta, el bosque evapora de manera mucho más eficaz que la hierba el agua depositada sobre la superficie vegetal. Esta evaporación se produce en condiciones en que la aportación de energía radiativa acostumbra ser baja (cielos nublados).

Las pérdidas de agua interceptada por las copas de los árboles suponen entre un 10 y un 40 % de la precipitación incidente; la cuantía exacta depende de las características de las cubiertas forestales y de las condiciones climáticas. En la cabecera del río Llobregat, y en una parcela de coníferas formada por reforestación espontánea en una área de campos abandonados, esa merma se cifra en el 25 % de la precipitación anual, según el trabajo experimental realizado por el grupo de conservación de tierras y aguas del Instituto de Ciencias de la Tierra "Jaume Almera", del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

El bosque, pues, es un gran consumidor de agua al evaporar directamente un alto porcentaje del agua de lluvia que ni siquiera llegará al suelo. Ello significa que la reforestación, espontánea o promovida, de las tierras marginales tiene un coste hidrológico elevado y crítico en un país de recursos de hídricos limitados. Por consiguiente, la gestión ambiental de las áreas de cabecera debería sopesar los valores ambientales atribuibles al bosque con este mayor consumo de agua.

PILAR LLORENS
Instituto de Ciencias de la Tierra 'Jaume Almera', CSIC, (Barcelona)

DE CERCA

Texto y fotos: Albert Masó

Buscando su camino

De las icnitas de la Rioja a las pisadas de homínidos de Laetoli, paso a paso o a la carrera, el animal siempre ha emigrado en busca de alimento o zona más segura. Paremos la atención en la fotografía inferior. Apenas si distinguimos unos animalillos que avanzan, diríase de incógnito, por el desierto del Kalahari. Con un pelaje de color críptico con la arena del terreno, se mueven con la lentitud obligada en estas zonas donde cae un sol de justicia. (Los ñues del Serengeti abren incluso, en su caminar, un surco en el suelo.) El calor impide la carrera, y hasta el paso ligero, que supondrían un excesivo gasto energético, una peligrosa deshidratación y hasta un posible shock térmico.

A esta distancia, podría parecer que se trata de un grupo de gacelas de Thomson, pero la segunda fotografía permite apreciar que es, en realidad, *Antidorcas marsupialis*. Se distingue de aquélla por su talla, algo mayor, y, sobre todo, por tener los cuernos en forma de lira en ambos sexos. En español lo llamamos antílope saltador, por el peculiar comportamiento que despliega en momentos de peligro: con una altura de poco más de un metro, salta hasta tres y medio, adoptando una postura muy característica con las patas tensas y los pelos blancos del lomo erizados. Estos brincos, realizados sin esfuerzo aparente, se interpretan como una advertencia al depredador de que dispone de suficiente energía para una eficaz huida, lo que podrá realizar a la velocidad de 88 kilómetros por hora.

Resiste meses sin abrevar. Para compensar la deshidratación que se produce en el desierto, busca el camino en que hay más arbustos. Ramonea sin cesar (*tercera fotografía*), no sólo para alimentarse sino, sobre todo, para rehidratarse. En el siglo pasado, las poblaciones de antílopes saltadores eran muy numerosas. Se concentraban por decenas de millones para iniciar la gran emigración, normalmente hacia el mar. Tan grande era la manada, que tardaba horas en pasar por un mismo punto y, al llegar al mar, morían en masa por falta de alimento y porque bebían el agua salada. Hubo un año en que los cuerpos de estos antílopes formaron, en la desembocadura del río Orange, una barrera de cuarenta kilómetros a lo largo de la costa. Actualmente, las poblaciones han disminuido muchísimo, hasta desaparecer de la parte meridional de Sudáfrica. Se ha reintroducido en diversos sitios, pero en el Kalahari quedan poblaciones originales, como la captada en estas fotografías.



Técnica fotográfica:

La primera toma es de paisaje*: se ha realizado con un objetivo gran angular de 20 mm (f. 2,8) para que, con su ángulo de cobertura de 94º, abarcara el mayor espacio posible. Con una película de 25 ISO, la velocidad de obturación fue de 8 y el diafragma, cerrado (f. 16), para tener suficiente área enfocada.*

Las otras exposiciones se han realizado con la técnica de caza fotográfica*, utilizando un objetivo de 400 mm (f. 5,6). La segunda se ha hecho con película de 100 ISO, a un diafragma f. 8 y a una velocidad de 125 para evitar el efecto de imagen movida. Para la tercera fotografía se empleó un teleconvertidor que duplica la distancia focal (queda a 800 mm) y provoca la pérdida de dos diafragmas; la máxima luminosidad es de f. 11. Se usó esta posición y un film de 200 ISO para mantener la velocidad de disparo. Aun así, al tener un ángulo de 6º, hubo que apoyar la cámara en un trípode para fijar la imagen.*

La cooperación en los leones



Aunque son los más sociales de todos los felinos, los leones sólo cooperan en su propio interés individual

Craig Packer y Anne E. Pusey

En la imaginación popular, los leones que cazan para comer ofrecen una maravillosa coreografía de grupo: a la luz mortecina del atardecer, una banda de furtivos felinos surge de las sombras como asesinos disciplinados y rodea a su confiada presa. Los leones parecen ser animales sociales arquetípicos, que se sobreponen a las desavenencias mezquinas para trabajar juntos por un objetivo común, en este caso, su próxima pitanza. Pero después de pasar muchos años observándolos en la naturaleza, hemos llegado a una opinión menos entusiasta.

Nuestra labor empezó en 1978, cuando tomamos el testigo de la investigación sobre la población de leones del Parque Nacional

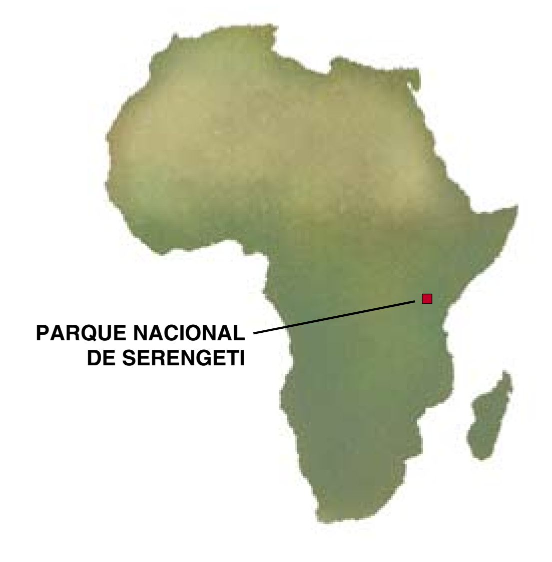
1. LAS LEONAS JOVENES, como las aquí fotografiadas, se asocian en grupos de seis a 10, llamados hordas. Tal vinculación no siempre las hace cazadoras más eficaces, como antaño suponían los científicos; con frecuencia las leonas solitarias comen más que los individuos de una horda. En cambio, la vida en común hace de las leonas mejores madres: las compañeras de grupo comparten las responsabilidades de criar y proteger a la prole. Gracias a ello, sobreviven más cachorros hasta la edad adulta.



2. LA HERMANDAD DE LEONAS posibilita que las compañeras de grupo protejan a sus cachorros contra machos invasores (*arriba*). Un grupo de leonas airadas puede ahuyentar a un macho solitario, cuyo tamaño es por término medio un 50 por ciento superior al de las hembras (*centro*). Y con frecuencia atacarán y matarán a hembras transgresoras, menos potentes (*abajo*).

de Serengeti, en Tanzania, que había iniciado en 1966 George B. Schaller, encuadrado en Conservación Internacional de la Fauna Salvaje, dependiente de la Sociedad Zoológica de Nueva York. Por nuestra parte, esperábamos descubrir por qué razones los leones se agrupaban para cazar, criar a sus cachorros y, entre otras tareas más, amedrentar a los rivales con su sinfonía de rugidos. Tamaña solidaridad no tenía mucho sentido evolutivo. Si el éxito máximo del comportamiento de un animal se mide por el número de descendientes vivos que produce a lo largo de su vida, entonces la cooperación no sale necesariamente a cuenta: si un animal es demasiado generoso, sus compañeros se benefician a sus expensas. ¿Por qué motivo, pues, las reglas evolutivas del egoísmo genético no parecían ser de aplicación a los leones?

Suponíamos ingenuamente que en dos o tres años resolveríamos la cuestión. Pero los leones son consumados expertos en no hacer nada. A la lista de gases nobles inertes (criptón, argón y neón), nosotros añadiríamos el león. Hemos tenido que recurrir a estrategias de investigación muy diversas para descubrir pistas acerca del comportamiento de este felino. Hemos analizado su leche, sangre y ADN; lo hemos distraído con registros de grabación y maniquíes disecados; y hemos colocado a algunos indi-



3. LOS MACHOS DESAFIAN rápidamente a los leones que no conocen, sean reales o no. Cuando los autores hicieron oír sonidos grabados de rugidos de machos extraños en el territorio de una coalición, los representantes de dicha coalición se dirigieron inmediatamente hacia el sonido. Además, solían pasar a la ofensiva, arrojándose sobre los señuelos situados en las inmediaciones.



viduos collares de rastreo mediante radio. Si consideramos que los leones en libertad viven hasta 18 años, se entenderá que hayamos tardado tanto en aportar las primeras respuestas convincentes. Pero, tal como la vamos descubriendo, la base evolutiva de la sociabilidad entre los leones reviste mucha mayor complejidad que lo que jamás hubiéramos podido intuir.

Acotación de un territorio

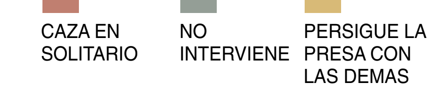
Los machos forman alianzas que duran toda la vida con otros de su género, en número de uno a ocho. No las entablan por ningún ánimo fraterno, sino para maximizar sus propias probabilidades de reproducirse. La mayoría de los asociados son hermanos y primos del mismo grupo de guardería, o jardín de infancia. Otros son leones no emparentados que se añadieron al grupo después de una fase nómada en solitario. Una vez llegan a la madurez, estas coaliciones toman a su cargo los grupos de leonas, llamados hordas, y engendran a todos los descendientes nacidos en la horda durante los dos o tres años siguientes. Pasado este tiempo, suele aparecer una coalición rival que los expulsa. En consecuencia, el éxito reproductor de un león depende directamente de la eficaz resistencia que su coalición oponga a los desafíos de los grupos formados por machos foráneos.

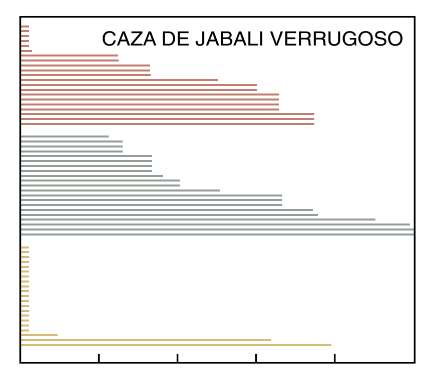
Los leones macho extreman su colaboración cuando se trata de ahuyentar a los invasores, que es la situación que presenta la mayor amenaza para su interés a la vez propio y común. Por la noche los leones rondan por su territorio, haciendo exhibición de sus dominios mediante una serie de fuertes rugidos. Siempre que emitíamos registros sonoros de los rugidos de un macho extraño en el territorio de una coalición, la respuesta era inmediata: los leones buscaban el altavoz e incluso atacaban a un león disecado que en ocasiones poníamos

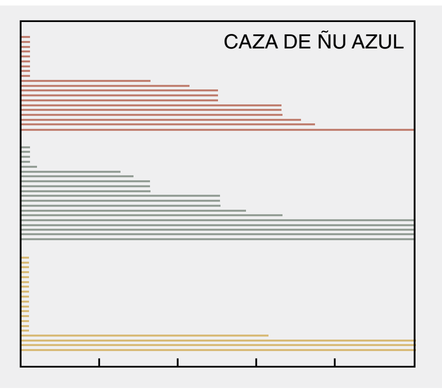
4. EL PARQUE NACIONAL DE SERENGETI, en Tanzania, alberga una población de leones que ha sido estudiada por los expertos desde 1966.

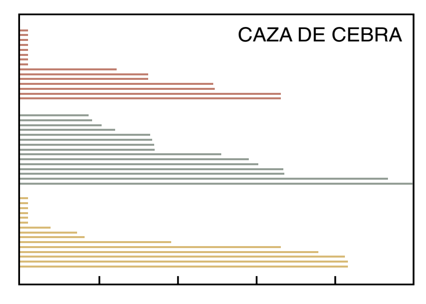
5. LA CAPTURA DE LA PRESA la suele realizar una sola leona cuando caza jabalí verrugoso y ñu azul (*fotografías*). Debido a que tiene grandes probabilidades de capturar a una presa tan fácil, sus hermanas podrán comer aunque no participen. Así, con frecuencia la horda se encuentra a una distancia segura, a la espera de una pitanza gratuita. Pero cuando se reducen las probabilidades de que una leona solitaria aseste un golpe mortal (si está acechando a una cebra o un búfalo), sus compañeras se unirán a ella para perseguir juntas a la presa (*gráficos*).

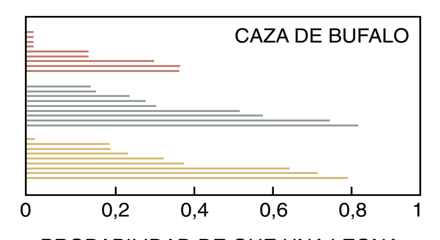
COMPORTAMIENTO POSIBLE
DE UNA LEONA EN LA CAZA











PROBABILIDAD DE QUE UNA LEONA
SE COMPORTE COMO SE INDICA



6. LAS PRESAS CAZADAS son compartidas por toda la horda. Si la presa es abatida cerca del hogar, las madres llevan a sus cachorros al festín. Pero cuando la matanza se realiza más lejos, las crías obtienen el alimento en forma de leche.

al lado. Tras ejecutar docenas de tales experimentos, Jon Grinnell, un licenciado que trabajaba con nosotros, encontró que los compañeros no emparentados se muestran tan cooperadores como los hermanos y que los socios se acercaban al altavoz aunque sus compañeros no pudieran observar sus acciones. De hecho, las respuestas de los machos a veces rozaban el suicidio, pues se acercaban al altavoz aunque se hallaban en desventaja de tres leones (grabados) a uno.

En general, los grupos grandes dominan a los pequeños. En las coaliciones mayores, los machos suelen ser más jóvenes cuando consiguen entrar en la horda, su pertenencia a la misma dura más tiempo y tienen más hembras en su dominio. En realidad, las ventajas reproductoras de la cooperación son tan grandes, que la mayoría de los machos solitarios aúnan fuerzas con otros solitarios. No obstante, esta asociación de leones no emparentados jamás supera el trío. Las coaliciones de cuatro a nueve machos las integran siempre parientes próximos. ¿Por qué los machos solitarios no reclutan más socios hasta que sus grupos alcanzan, asimismo, un tamaño insuperable? De nuevo, las razones se basan en la autoconservación genética y, en especial, en sopesar las probabilidades de obtener acceso a una horda frente a las de conseguir engendrar hijos.

Aunque las coaliciones grandes son las que producen más descendientes per cápita, este promedio supone una división equitativa entre compañeros; pero no es ésa la forma de cooperación que se da en el Serengeti. En realidad, el primer macho que encuentra a una hembra en estro la guarda celosamente, se aparea repetidamente con ella durante los cuatro días siguientes y ataca a otros machos que puedan acercarse demasiado. Dennis A. Gilbert, en el laboratorio de Stephen J. O'Brien en el Instituto Nacional del Cáncer, acometió la identificación del ADN de cientos de nuestras muestras de leones y encontró que, por lo general, un solo macho era el padre de toda una camada. Además, sólo en las coaliciones de dos machos la reproducción se repartía de manera equitativa. En las coaliciones mayores, unos pocos machos eran los progenitores de la mayoría de los cachorros. Quedarse sin hijos no es demasiado malo desde el punto de vista genético si el socio que tiene más éxito es el propio hermano o primo. Uno puede todavía reproducirse por poderes, sembrando el mundo de sobrinos y sobrinas que portan los genes de nuestro linaje. Pero si se es un león solitario, no sale a cuenta la unión de fuerzas con más de uno o dos leones sin vinculación familiar.

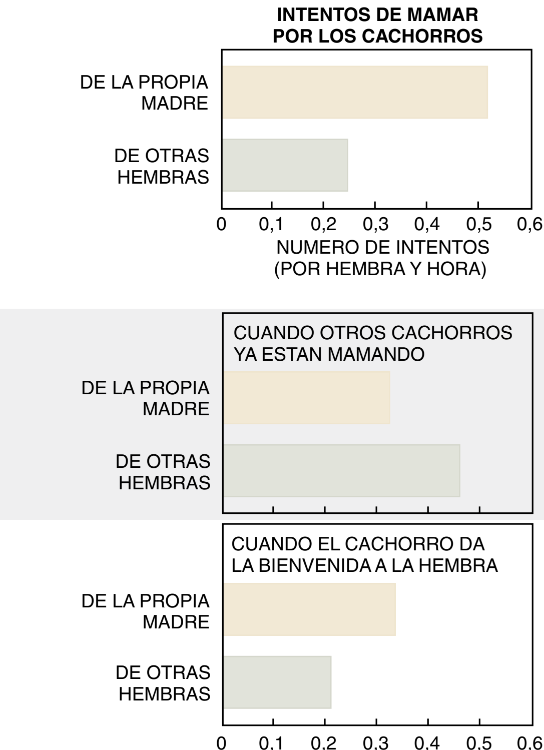
Caza

Se creía tradicionalmente que las leonas vivían en grupos porque así se beneficiaban de la caza en común. (Las hembras cazan con más frecuencia que los machos del clan.) Sin embargo, una observación más atenta nos ha permitido comprobar que los grupos de leonas cazadoras no se alimentan mejor que las hembras solitarias. La verdad es que los grupos mayores están en desventaja porque, con frecuencia, las compañeras rehúsan cooperar en la captura de las presas.

En cuanto una hembra ha iniciado la caza, sus compañeras pueden o no unirse a ella. Si la presa es de proporciones suficientes para que coma toda la horda, fenómeno habitual, las compañeras se enfrentan ante un dilema: la caza conjunta podría tener mayor probabilidad de éxito, pero si se suman deberán esforzarse y correr el riesgo de salir heridas; en cambio, si una cazadora abate en solitario la presa, sus compañeras de horda podrían obtener comida gratis. Por consiguiente, las ventajas de la caza cooperativa dependerán de la medida en que una segunda cazadora mejore las probabilidades de éxito de su compañera, lo que, a su vez, depende de la capacidad venatoria de la compañera. Si es seguro el éxito de una en solitario, los beneficios resultantes de prestarle ayuda no superarían nunca los costes. Pero si la leona no puede por sí sola abatir la presa, las ven-



7. **EL AMAMANTAMIENTO es una tarea que comparten todas la madres de una horda. No lo hacen por generosidad, sino por fatiga. Los cachorros maman cuando sus madres retornan de cazar (*arriba*). Si las madres permanecen despiertas no permiten que otras crías, como la crecidita de la fotografía, les tomen leche (*abajo*). Aunque los cachorros intentan mamar con más frecuencia de su propia madre, pueden ser muy diestros a la hora de obtener leche de otras hembras (*gráficos*).**



tajas de la ayuda de una compañera incorporada al ataque bien pueden superar los costes.

Pruebas recabadas de una amplia diversidad de especies de insectos, aves y mamíferos sugieren que, como era de esperar, la cooperación es más sincera cuando los cazadores solitarios necesitan ayuda. La otra cara de la moneda de esta tendencia es que las especies se muestran más reacias a la cooperación cuando los cazadores tienen más posibilidades de tener éxito por sí solos. En coherencia con esta observación, David Scheel, un licenciado que trabaja con nosotros, encontró que los leones del Serengeti actúan frecuentemente juntos cuando se las han de haber con presas difíciles: búfalos y cebras, por ejemplo. Pero cuando ataca a presas fáciles (ñúes azules o jabalíes verrugosos) una leona suele cazar sola; sus compañeras la observan desde la barrera.

Las condiciones no son las mismas en todo el mundo. En los llanos de Etosha, de Namibia, los leones cazan la gacela saltarina, uno de los antílopes más rápidos, en terreno abierto. Un solo león no podría capturar nunca a una gacela saltarina; por tanto, actúan siempre en cooperación. Philip Stander, del Ministerio de Ambiente y Turismo de Namibia, compara las tácticas de caza de los leones con la estrategia de un equipo de rugby, en el que las alas y los centros se desplazan al unísono para rodear al balón, o a la presa. Este trabajo en equipo muy estructurado supone un claro contraste con el estilo de caza desorganizado de los leones del Serengeti.

Todas las leonas, vivan en el Serengeti o en otra parte, ofrecen un alto grado de cooperación en la cría de los cachorros. Las hembras paren en secreto y mantienen ocultas a sus crías en el lecho seco de un río o en un saliente rocoso durante al menos un mes, tiempo durante el cual los cachorros, inmóviles, son muy vulnerables a los depredadores. Pero, una vez los cachorros pueden moverse, la madre los lleva a terreno abierto para unirse al resto de la horda. Si cualquiera de las otras hembras tiene cachorros, forman un jardín de infancia y permanecen en asociación casi constante durante el año y medio siguiente antes de volver a criar. Las madres conducen a sus cachorros hasta las presas muertas de las inmediaciones; el alimento procedente de pitanzas más distantes se lo suministran en forma de leche. Cuando retornan de lugares alejados, las madres se desploman, y dejan que sus crías se amamanten mientras ellas duermen. Hemos estudiado alrededor de una docena de jardines de infancia y, prácticamente en todos los casos, a cada cachorro se le permite amamantarse de todas las madres del



8. EL AFECTO es común entre las componentes de una horda, que dependen unas de otras para la protección de sus crías. Los leones macho presentan uno de los principales peligros: si una coalición se apodera de una nueva horda, los recién llegados, deseosos de engendrar sus propios descendientes, matarán a todos los cachorros pequeños de una horda y expulsarán a los cachorros mayores.

grupo. El amamantamiento comunal es un componente principal del sistema cooperativo de los leones.

Y sin embargo, como ocurre con la mayoría de las demás formas de cooperación entre los leones, este comportamiento no es tan noble como parece. Los miembros de un jardín de infancia se alimentan de las mismas presas y retornan al grupo constituido por sus cachorros. Algunas son hermanas; otras, madre e hija; y las hay que sólo primas. Algunas tienen un solo cachorro; muy pocas, camadas de cuatro; lo habitual son madres de dos o tres cachorros. Ordeñamos a cerca de una docena de hembras y nos sorprendió descubrir que la cantidad de leche de cada mama dependía de la cantidad de alimento que había tomado cada hembra y no del tamaño real de su camada.

Puesto que algunas hembras de una horda tienen más bocas a las que alimentar, pero todas producen aproximadamente la misma cantidad de leche, las madres de camadas pequeñas pueden permitirse ser más generosas. Y, de hecho, las madres de un solo hijo dejan que una proporción mayor de su leche vaya a otros cachorros. Estas hembras revelan una mayor generosidad cuando sus compañeras de jardín de infancia son sus parientes más próximas. Así, la distribución de la leche depende en gran parte de un modelo de producción de excedentes y de parentesco. Estos factores influyen, asimismo, en el comportamiento de las hembras en otras especies: el amamantamiento comunal es más común en aquellos mamíferos (entre ellos roedores, cerdos y carnívoros) que típicamente paren un rango variable de tamaños de camada y viven en pequeños grupos emparentados.

Aunque las leonas amamanten a los hijos de otras leonas, procuran de entrada dar su leche a sus propios cachorros y rechazan los intentos de otras crías hambrientas. Pero también necesitan dormir. Mientras dormitan, horas enteras, suponen una enorme tentación para los cachorros. El pequeño que pretende mamar de una leona que no es su madre espera a que ésta coja el sueño o se distraiga en algo. Por tanto, las hembras deben equilibrar el esfuerzo necesario para resistir las atenciones de estos pelmazos frente a su propio agotamiento.

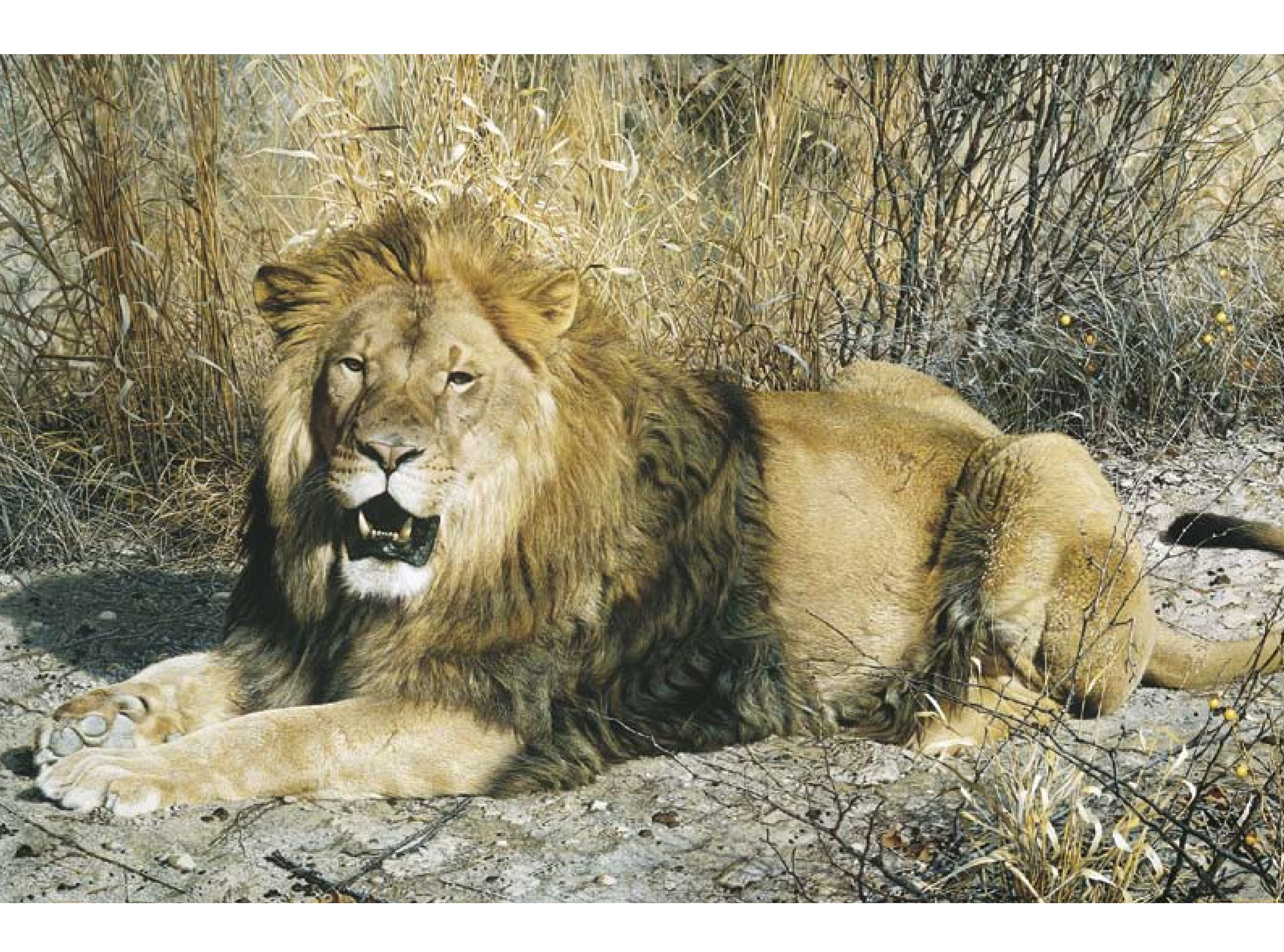
Así pues, la generosidad entre las leonas es en buena medida un asunto de indiferencia. Las hembras que tienen menos que perder son las que mejor duermen, debido al pequeño tamaño de su propia camada o a la compañía de parientes cercanos. Las hembras de hiena manchada han resuelto este conflicto al mantener a sus cachorros en un cubil bien protegido. Las madres retornan a sus cachorros durante períodos cortos, dan de comer a su camada y después duermen en paz en algún otro lugar. Observando a hienas en su cubil encontramos que las hienas madre eran objeto de tantos intentos de amamantamiento como las leonas, pero las hienas estaban más alerta y así evitaban que mamaran otros que no fueran sus propios hijos.

Sobrevivir en el Serengeti

Como hemos visto, las leonas desarrollan pautas más gregarias cuando tienen cachorros que dependen de ellas; el jardín de infancia es el núcleo social de la horda. En ocasiones, hembras sin hijos visitan a sus compañeras madres. Por norma, sin embargo, prefieren vivir apartadas, bien alimentadas y sin las complejidades sociales del comedor o de la guardería. Las madres no forman un jardín de infancia para alimentar mejor a sus cachorros. Es más: las madres gregarias pueden comer menos que las madres solitarias; no poseen ningún sistema de niñeras que asegure un suministro de alimentos más continuo. El motivo por el que las leonas madre forman un jardín de infancia no es otro que el de su propia defensa y la de su prole.

Una hembra necesita dos años para criar a sus cachorros hasta que éstos se hacen independientes, pero si éstos mueren en cualquier momento, la leona se aparea a los pocos días y su intervalo entre partos se acorta hasta un año. Los leones raramente demuestran afecto hacia sus hijos, pero sus excursiones territoriales proporcionan una protección eficaz. Ahora bien, si la coalición paterna es expulsada, los sucesores se apresurarán a criar una nueva serie de descendientes. Cualquier cachorro que proceda del régimen anterior supone un impedimento para el deseo inmediato de la nueva coalición de aparearse, por lo que debe ser eliminado. Más de la cuarta parte de todos los cachorros son muertos por machos invasores. Las madres son las víctimas últimas de este conflicto interminable, y defienden vigorosamente a sus cachorros frente a los machos entrantes. Pero los leones son casi un 50 por ciento mayores que las leonas; las madres suelen perder en el combate de uno contra uno. En cambio, la cofradía femenina les ofrece una oportunidad de lucha; en muchos casos, las compañeras de jardín de infancia tienen éxito en la defensa de su prole.

CRAIG PACKER y ANNE E. PUSEY son profesores del departamento de ecología, evolución y comportamiento de la Universidad de Minnesota. Han realizado sus estudios en el Instituto de Investigación de la Vida Salvaje de Serengeti, la Universidad de Chicago y la Universidad de Sussex. Packer defendió su tesis doctoral en 1977, en Sussex, año en que Pusey recibió también el mismo grado por Stanford.



Los leones no son su único problema. También las leonas son territoriales. Defienden sus terrenos de caza favoritos, sus lugares de escondrijo y pozas de agua contra otras hembras. Las hordas grandes dominan a las pequeñas, y las hembras atacan y matan a sus vecinas. Mientras que la mayoría de los machos concentran su reproducción en unos pocos años, las hembras pueden gozar de una vida reproductora de hasta 11 años. Por esta razón, las disputas fronterizas entre hordas duran más que los desafíos entre coaliciones de machos, y así las leonas siguen una estrategia más cautelosa cuando se enfrentan a extraños. Karen E. McComb, ahora en la Universidad de Sussex, encontró que las hembras intentan repeler a grupos de hembras grabadas en cinta magnetofónica sólo cuando el grupo real era más numeroso que el grupo grabado en al menos dos individuos. Las hembras pueden contar, y prefieren un margen de seguridad. Los números son un asunto de vida o muerte, y una horda de sólo una o dos hembras está condenada a una existencia fútil, a evitar a otras hordas y a no criar nunca cachorros.

La horda de leones es un refugio en el que los individuos unidos por intereses reproductores comunes pueden prepararse para el próximo paso del enemigo. Este lo integran otros leones (otros machos, otras hembras) y nunca será derrotado. A lo largo de los años, hemos visto cientos de machos llegar e irse, y el mismo modelo general en cada coalición: invasión, asesinato y paternidad, seguidos de una decadencia y caída inevitables. Docenas de hordas han empezado a reinar sobre su propio retazo del Serengeti; mas, por cada horda nueva que se ha establecido con éxito, otra ha desaparecido. Las leonas pueden parecer magníficas en su causa común, luchando con sus vecinas por el territorio y desviando los avances no deseados de los machos. Pero el rey de las bestias (*arriba*) ejemplifica por encima de todo el crisol evolutivo en el que se forja una sociedad cooperativa.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A MOLECULAR GENETIC ANALYSIS OF KINSHIP AND COOPERATION IN AFRICAN LIONS. C. Packer, D. A. Gilbert, A. E. Pusey y S. J. O'Brien en *Nature*, vol. 351, n.º 6327, páginas 562-565; 13 junio, 1991.

INTO AFRICA. Craig Packer. University of Chicago Press, 1994.

NON-OFFSPRING NURSING IN SOCIAL CARNIVORES: MINIMIZING THE COSTS. A. E. Pusey y C. Packer en *Behavioral Ecology*, vol. 5, n.º 4, págs. 362-374; invierno 1994.

COMPLEX COOPERATIVE STRATEGIES IN GROUP-TERRITORIAL AFRICAN LIONS. R. Heinsohn y C. Packer en *Science*, vol. 269, n.º 5228, págs. 1260-1262; 1 septiembre 1995.

Las galaxias del universo joven

Mediante la comparación de las remotas galaxias primigenias con las más viejas y cercanas se espera determinar cómo se forman y evolucionan las galaxias

F. Duccio Macchetto y Mark Dickinson



Nuestra concepción del universo ha cambiado de forma radical en este siglo, de la mano de los avances experimentados por la observación astronómica. El trabajo pionero de Edwin Hubble en los años veinte condujo a la idea según la cual el universo nació de una "gran explosión" y desde entonces se expande. Los estudios realizados más tarde revelaron que, con el paso del tiempo, el universo cambia también de otras maneras. Al principio estaba repleto de una materia extremadamente caliente, densa y casi uniforme; ahora abunda el vacío. Cuando los astrónomos dirigen su mirada a través de millones de años luz, la materia que ven se concentra en una gavilla dispersa de galaxias aparentemente aisladas. Cómo ocurrió esta transformación y por qué las galaxias se formaron así, sigue siendo hoy una incógnita fundamental en cosmología.

Las galaxias cercanas, fruto de unos 10.000 millones de años de evolución, han sido objeto de un estudio intenso. Pero en los últimos tiempos se han dado pasos de gigante en la investigación de las galaxias que se hallan a distancias cosmológicas, es decir, las que existieron en las etapas iniciales del universo. Gracias a la velocidad finita de la luz, cuando se observa lo más lejano se mira directamente el pasado. En estos momentos los cosmólogos ópticos pueden ver galaxias remotas, de cuando el universo contaba con menos de una quinta parte de su edad actual. Con nuevos instrumentos y técnicas se espera detectar las galaxias "primigenias" en su proceso de gestación y seguir su evolución hasta nuestros tiempos.

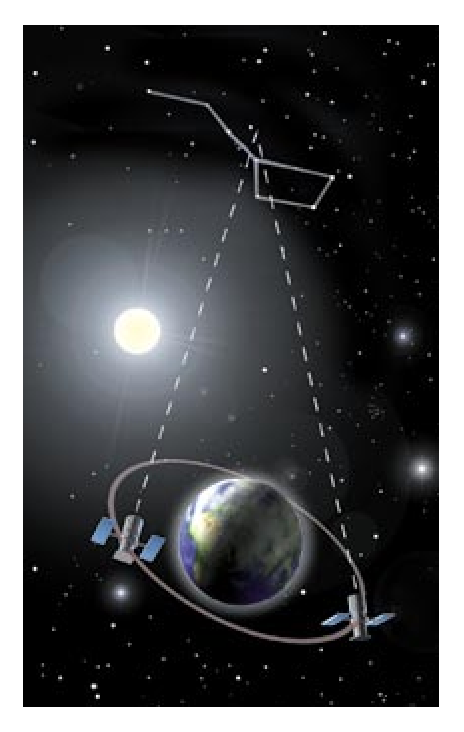
Naturalmente, las cosas no resultan fáciles en la práctica. Las galaxias jóvenes están tan lejos, que parecen pequeñas y débiles incluso para los telescopios más potentes.

1. LAS OBSERVACIONES de campo profundo del HUBBLE proporcionan la imagen más clara, hasta la fecha, del universo lejano (*imagen compuesta a la izquierda*). Para construir estas imágenes, se apuntó el telescopio hacia una franja del cielo cuyo tamaño es 1/140 del tamaño aparente de la luna llena, cerca de la Osa Mayor, durante diez días de diciembre de 1995 (*diagrama*). Los astrónomos confían en que, gracias al estudio de las débiles galaxias primigenias y de las más viejas y cercanas, les será dado conocer la evolución de las galaxias.

F. DUCCIO MACCHETTO y MARK DICKINSON se hallan adscritos al Instituto Científico del Telescopio Espacial, de Baltimore. Macchetto ocupa el cargo de director adjunto de programas científicos del Telescopio Espacial Hubble. Dickinson investiga en la Universidad Johns Hopkins.

Una galaxia del tamaño de nuestra Vía Láctea, observada tal como era cuando el universo tenía la mitad de su edad actual, cubriría en el cielo un ángulo de sólo unos segundos de arco. Vista por medio de los telescopios terrestres, perdería la mayoría de sus características estructurales; incluso con excelentes condiciones atmosféricas, a menudo no puede hacerse mucho más que distinguir las galaxias remotas de las estrellas débiles. Sin embargo, en los últimos años el Telescopio Espacial Hubble —que al estar por encima de la atmósfera terrestre cuenta con una vista agudísima— ha proporcionado imágenes detalladas de los confines del universo.

Muchos programas de investigación del Hubble se dedican al estudio de las galaxias jóvenes, aunque hay uno en particular que ha centrado la atención. En diciembre de 1995 el Hubble apuntó a una zona del cielo, muy corriente, situada cerca de la Osa Mayor, cuyo tamaño era 1/140 veces el tamaño aparente de la luna llena. Se eligió esa zona porque proporcionaba una vista clara hacia



el exterior de nuestra galaxia y un emplazamiento donde dejar apuntado eficazmente el telescopio. Durante diez días completos el Hubble tomó cientos de exposiciones a través de cuatro filtros, cubriendo el espectro desde el ultravioleta hasta el infrarrojo cercano. Estas imágenes, conocidas como observaciones de campo profundo del Hubble (HDF, de *Hubble Deep Field*), nos han suministrado las mejores vistas del universo lejano (en la jerga astronómica el término "profundo" significa tenue y remoto).

Las imágenes del HDF muestran unas 3000 galaxias débiles, con una variedad asombrosa de tamaños y colores. Muchas son más de mil millones de veces más débiles de lo que puede apreciarse a simple vista. El problema estriba en la interpretación de estas imágenes bidimensionales de un universo tetradimensional. Al fin y al cabo, todo lo que cae en la línea de visión —cercano o lejano, joven o viejo— se proyecta sobre el mismo plano del cielo. No se trata sólo de identificar las galaxias primigenias que haya en esa mezcla, sino también de comparar sus características con las de otras galaxias más viejas y cercanas o situadas a distancias intermedias. Con ello esperamos determinar el origen y evolución de las galaxias.

No es fácil calcular cuán vieja es una galaxia a partir tan sólo de su tamaño o de su brillo. Los objetos débiles cercanos a nosotros y los situados más lejos, aunque intrínsecamente brillantes, pueden ofrecer un aspecto muy similar. Pero disponemos de otros mecanismos para determinar su edad. Por ejemplo, debido a que el universo se encuentra en perpetuo estado de expansión, la lejanía de una galaxia es proporcional a la velocidad con que se aparta de nosotros. Esta recesión le origina un corrimiento Doppler en la luz que emite una galaxia. En consecuencia, sus rasgos espectrales característicos están desplazados hacia el rojo, es decir, hacia longitudes de onda mayores. Al medir este "corrimiento hacia el rojo", z, podemos determinar la distancia relativa de una galaxia y su edad.

La cronología de la historia cósmica viene dada por el corrimiento hacia el rojo: los valores de z mayores representan épocas más tempranas, cuando el universo era más chico, más joven y más denso. El universo, desde el tiempo que corresponda a un valor cualquiera de corrimiento hacia el rojo z, se ha expandido en un factor de $(1 + z)$. La relación entre



2. IMAGENES de extraordinario detalle procedentes de las observaciones del HDF. Nos muestran un número incontable de galaxias. Al fin y al cabo, todo lo que está situado a lo largo de la línea de visión —cerca o lejos, joven o viejo— se proyecta sobre el mismo plano del firmamento. En total, las imágenes del HDF exhiben unas 3000 galaxias débiles, con una amplia gama de figuras y colores insólitos. Muchas son más de mil millones de veces más débiles de lo que puede observarse a simple vista.

z y la edad reviste mayor complejidad. Pero, en términos generales, un corrimiento hacia el rojo z significa que la imagen es de cuando el universo contaba como máximo con $1/(1+z)$ veces su edad actual. Por tanto, con un corrimiento hacia el rojo de 1, la imagen pertenece a cuando el universo tenía a lo sumo la mitad de la edad que tiene hoy día; con un corrimiento al rojo de 3, menos de un 25 % y quizá tan sólo un 12,5 %.

Una multitud de mediciones del corrimiento hacia el rojo han determinado ya las distancias de miles de galaxias débiles hasta $z = 1$, el límite práctico de los rastreos actuales. Las imágenes del Hubble nos permiten clasificar las galaxias, compararlas con otras más cercanas y evaluar su estado evolutivo. Muchas de estas galaxias parecen haber gozado en el pasado de relativa calma: las imágenes del Hubble descubren objetos elípticos y espirales muy brillantes, similares a los más cercanos, al menos hasta corrimientos hacia el rojo de 1. Incluso en épocas bastante precoces parece que el número de estas galaxias de aspecto normal era similar a la cifra total que hay en el universo actual. Por tanto, imaginamos que muchas galaxias han permanecido en muy buena medida inalteradas durante miles de millones de años.

Muchas otras, sin embargo, han experimentado grandes cambios, a juzgar por los rastreos de los desplazamientos al rojo y las imágenes del Hubble. Realicemos el simple ejercicio de contar galaxias del firmamento; veremos que hay demasiadas galaxias débiles. En el límite de las observaciones actuales aparecen al menos diez veces más galaxias que en el universo local. Sus colores azules y los fuertes elementos de emisión que exhiben en sus espectros sugieren que, en comparación con las galaxias actuales, producían estrellas con bastante rapidez, actividad que las hizo más brillantes y que, por tanto, sea más fácil detectarlas en los rastreos.

Además, muchas de estas galaxias presentan morfologías irregulares, lo que induce a pensar que, hace mucho tiempo, las interacciones, las fusiones incluso, entre las galaxias constituyeron un fenómeno común. Aunque se pueden encontrar galaxias irregulares y en interacción más cerca de nosotros, parecen haber abundado mucho más en un universo joven. En los límites extremos del HDF, el elenco de galaxias está dominado por un número ingente de objetos muy compactos, casi imperceptibles incluso para la agudísima vista del Hubble. Basándose en estos datos, los astrónomos concluyen que el ritmo global de la formación de estrellas ha descendido drásticamente durante la segunda mitad de la historia del universo y que la mayor parte de la actividad ha acontecido en las galaxias irregulares.



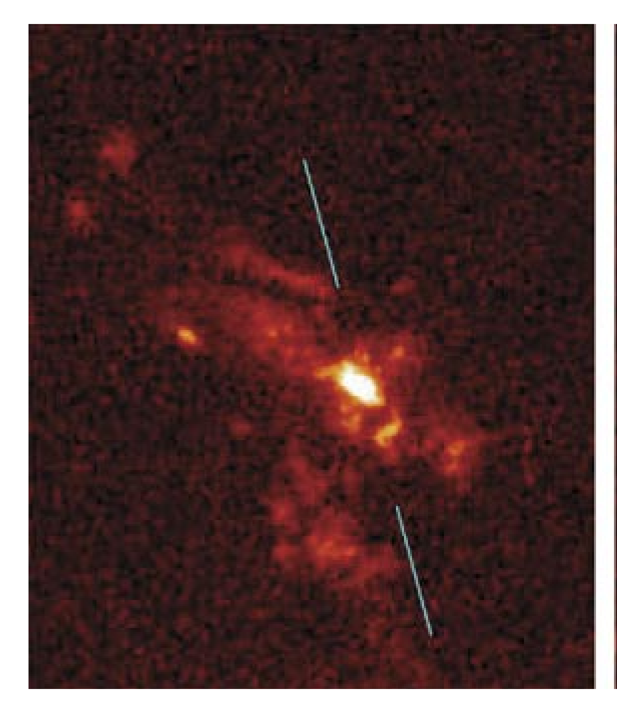
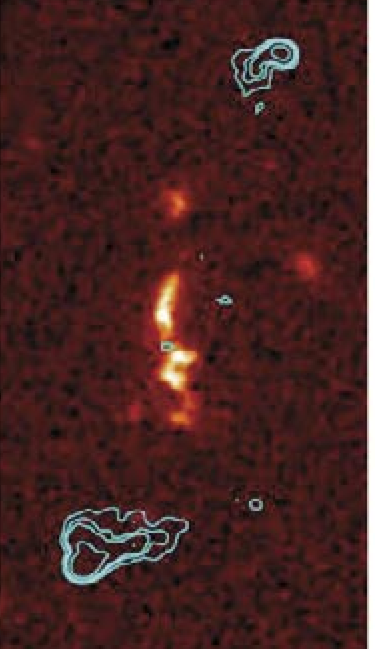
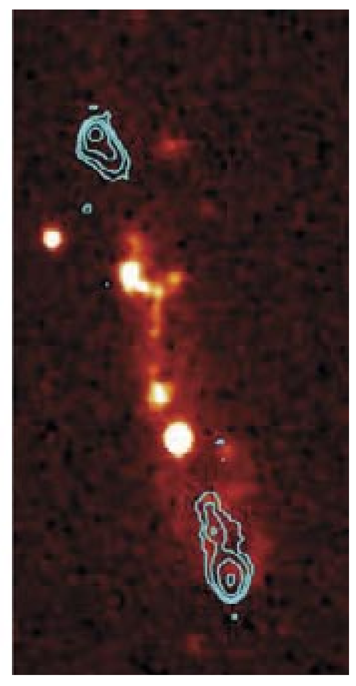
3. LAS GALAXIAS CON APAGON ULTRAVIOLETA abundan en las imágenes astronómicas más profundas. Vistas a través de varios filtros, estas galaxias remotas son observables a longitudes de ondas azules, rojas y verdes, pero desaparecen en las imágenes del ultravioleta cercano (*arriba*). El hidrógeno, un gas omnipresente en las galaxias y en el espacio que media entre ellas, absorbe toda la luz ultravioleta que sea más azul que determinada longitud de onda.

No se sabe todavía cuáles son los mecanismos físicos que impulsaron tal evolución, ni qué suerte han corrido esas galaxias. Quizás el ritmo de las interacciones galácticas era mayor sólo porque el universo era más pequeño y mediaba una distancia menor entre las galaxias. Es posible que la frecuencia de las interacciones disparase la formación estelar que ahora detectamos. O puede que las galaxias tempranas agotaran su reservorio de gas, dejasen de formar estrellas y se fueran apagando hasta tornarse casi invisibles. En cualquier caso, los hallazgos apuntan también a que la formación de las galaxias espirales y elípticas "normales" está fuera del alcance de la mayoría de los rastreos de los desplazamientos al rojo (se las encuentra en abundancia hasta $z = 1$). Por tanto, para ponerle el broche final a la historia, los astrónomos habrán de llevar la investigación un paso adelante y escudriñar el universo cercano en busca de restos de la población de "galaxias débiles azules", aparentemente extinguida.

Carecemos de un método directo de determinar la distancia de casi ninguna galaxia que se encuentre en el límite de las observaciones del HDF. La luz que desprenden no basta para medir sus corrimientos hacia el rojo, ni siquiera con los mayores telescopios. Se emplean, pues, otras técnicas para buscar galaxias que superen el $z = 1$. Uno de los métodos se sirve de objetos remotos, fuentes de radio por ejemplo, que hagan de faros. Algunas galaxias generan fuertes emisiones con longitudes de onda de radio, se supone que en un núcleo activo ubicado en el interior de la galaxia, como un cuásar oculto. Las radiogalaxias no son muy comunes hoy día, pero su emisión característica es capaz de llamar la atención en puntos remotos del universo. Así, algunas de las fuentes de radio más luminosas del cielo están situadas a enormes distancias y presentan desplazamientos al rojo muy parecidos a los de los cuásares más lejanos.

Gracias a las radiogalaxias

Las fuentes de radio potentes suelen originarse en galaxias elípticas, galaxias viejas según se acepta hoy. Se esperaba, por tanto, que las galaxias distantes que generan fuentes de radio fuesen el germen de las actuales elípticas. Sin embargo, tras un estudio más detenido, se observa que las radiogalaxias remotas presentan rasgos espectrales y morfológicos insólitos. Las nuevas imágenes del Hubble muestran estas particularidades, entre ellas unas configuraciones complejas y extrañas; parece como si esas potentes fuentes de radio pudieran alterar el aspecto y evolución de una galaxia. Algunas radiogalaxias bien podrían ser verdaderas galaxias

4. LAS RADIOGALAXIAS 3C265 (*izquierda*), 3C324 (*centro*) y 3C368 (*derecha*) manifiestan rasgos morfológicos y espectrales exclusivos. En estas imágenes compuestas, el Hubble captó las galaxias (*emisiones rojizas*) y el Radiointerferómetro de Base muy Extensa levantó mapas de radio (*líneas azules*). Las poderosas fuentes de radio podrían alterar el aspecto de una galaxia y quizá su evolución. Algunas radiogalaxias podrían ser genuinas galaxias primigenias.

primigenias, pero debido a que nos parecen tan anormales, resulta difícil interpretar sus propiedades en la actualidad. Resulta dudoso, por tanto, que sean las progenitoras de las galaxias normales modernas.

Afortunadamente las galaxias son gregarias; donde se detecta una, acostumbran florecer más. Con frecuencia, las radiogalaxias viven en cúmulos, rodeadas por otras galaxias débiles, más corrientes. Por medio de los nuevos y poderosos instrumentos y técnicas de observación disponibles hemos podido detectar y estudiar esas prosaicas compañeras. Se ha podido localizar un conjunto muy rico de galaxias alrededor de radiofuentes situadas a una distancia remota, de $z = 2{,}3$, lo que nos lleva a un universo que contaba, como máximo, con un 30 % de su edad actual. Unos cuantos de esos cúmulos lejanos han sido objeto de escrutador examen por el Hubble, el Keck, un poderoso telescopio terrestre de 10 metros instalado en Hawai, y el ROSAT, un telescopio orbital de rayos X.

Hay alrededor de la fuente de radio 3C324, a $z = 1{,}2$, un cúmulo que comparte muchas características con otros cúmulos ricos que tenemos más a mano. Aloja gas caliente que emite un brillo intenso a las longitudes de onda de los rayos X. Este agrupamiento nos descubre que algunos cúmulos galácticos jóvenes poseían una cantidad enorme de masa, lo que supone un grave apuro para determinadas teorías sobre la formación de las estructuras cósmicas. Además, el cúmulo que circunda a 3C324 contiene galaxias notablemente semejantes a las elípticas gigantes que pueblan los cúmulos más cercanos: presentan tonalidades rojas muy intensas y una morfología simple y esferoidal. Estas características indican que las estrellas de tales cúmulos galácticos lejanos habían ya alcanzado la madurez cuando emitieron la luz que estamos analizando ahora. Está claro que tuvieron que formarse mucho antes, a unos desplazamientos al rojo superiores. A ellos debe ahora extenderse la búsqueda del nacimiento de las estrellas.

Las propiedades de estas galaxias han centrado el debate sobre la edad del universo mismo. Las recientes investigaciones encaminadas a conocer la velocidad de la expansión cósmica, la constante de Hubble, sugieren que el universo podría ser más joven de lo que se pensaba. Algunas de las observaciones apuntan a que no habría cumplido los 10.000 millones de años de edad, aunque en nuestra Vía Láctea se han visto estrellas que, según se cree, superan de lejos esa edad. ¡Si son correctos tanto los datos de la constante de Hubble como las edades de las estrellas se produce, pues, una contradicción, un imposible! Si hay que admitir que las galaxias elípticas cercanas a 3C234, con un corrimiento hacia el rojo de 1,2, ya contaban con edades avanzadas, los problemas se agudizan aún más.

La búsqueda de cuásares

En su inquisición de galaxias primigenias, algunos astrónomos han buscado orientación en los cuásares, los objetos más brillantes del universo. Cuando la luz procedente de un cuásar remoto viaja hacia la Tierra, atraviesa nubes de gas que imprimen marcas características en el espectro en la forma de líneas de absorción. La mayoría de estas líneas espectrales son débiles; las produjeron seguramente gases tenues sin vinculación con las galaxias normales. Sin embargo, en ocasiones, las líneas son anchas y profundas y absorben totalmente la radiación del cuásar a esa longitud de onda. La masa y tamaño que se les deducen a esos absorbentes indican que forman parte de los discos o halos que rodean a las galaxias. Estas intensas marcas de absorción se pueden encontrar fácilmente con corrimientos hacia el rojo de 3 y superiores; tuvieron, pues, que existir ya galaxias en el universo joven para producirlas.

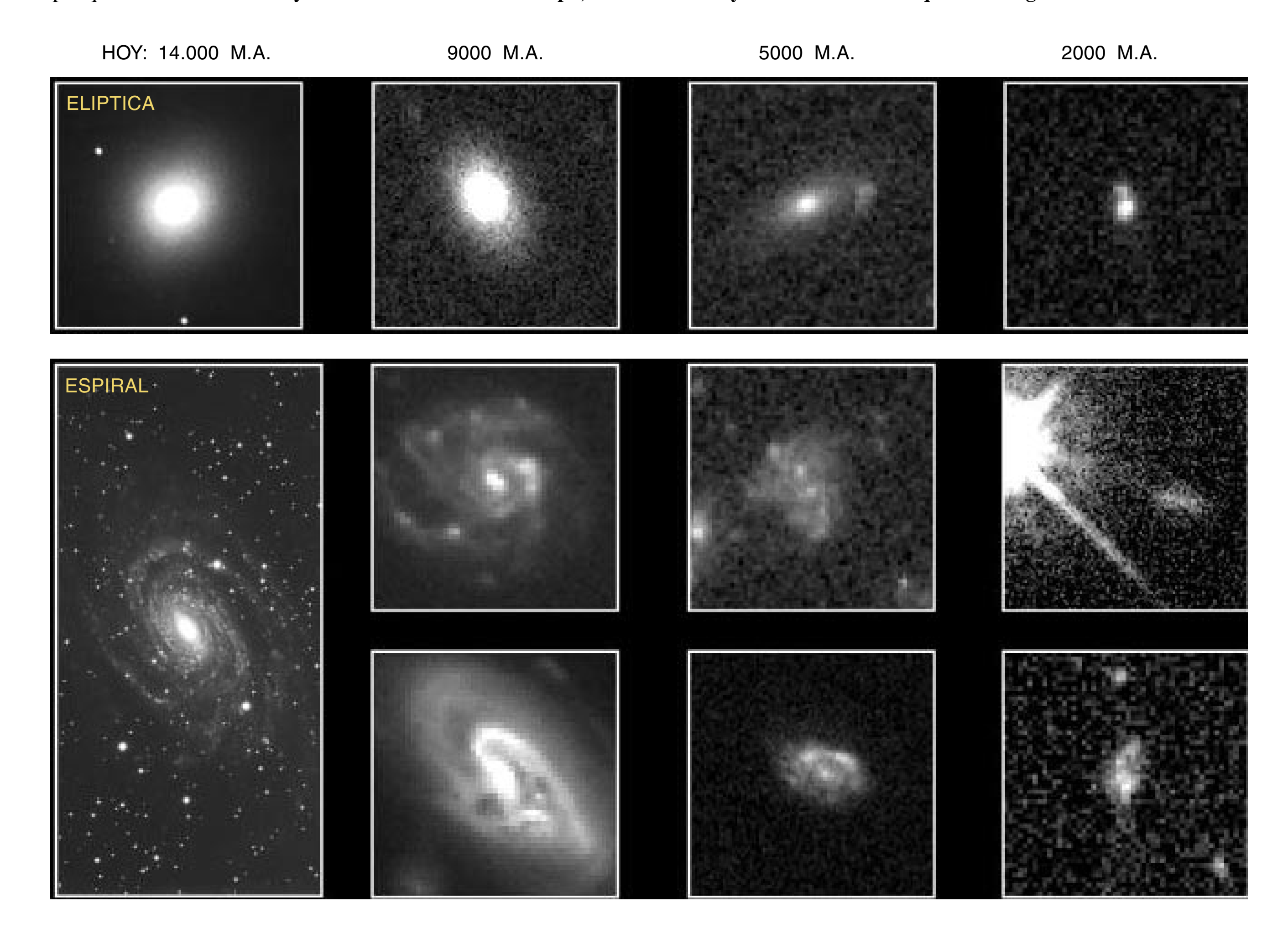
Según la teoría, las galaxias jóvenes se gestaron a partir de nubes de hidrógeno, donde nacen sin cesar

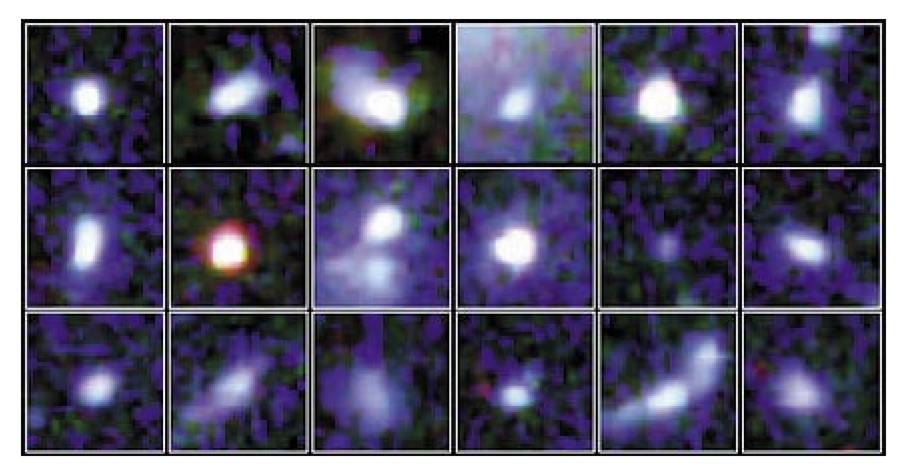
multitud de estrellas calientes azules. A medida que generaciones de estas estrellas completan los ciclos de su vida breve, el proceso de fusión nuclear transforma el hidrógeno en elementos más pesados, que los astrónomos engloban bajo el nombre genérico de “metales”. Estas estrellas tempranas explotan más tarde constituidas en supernovas, expulsando los metales hacia las nubes de gas que las rodean. Este proceso ejerce un efecto de choque y compresión sobre las nubes de gas, y se desencadena el nacimiento de una nueva generación de estrellas. Según este modelo, el espectro característico de una protogalaxia estaría dominado por una luz estelar azul, con algunos indicios de metales. Además, podría exhibir una fuerte línea de emisión Lyman-alfa, producida por ese hidrógeno tan abundante, calentado por las estrellas azules.

La búsqueda de la emisión Lyman-alfa procedente de las galaxias jóvenes con grandes corrimientos hacia el rojo se ha convertido en una industria de andar por casa, pero escasean los buenos ejemplos, quizá porque la radiación Lyman-alfa se reabsorbe con facilidad, sobre todo en presencia de polvo. Los mecanismos que producen los metales en las estrellas calientes también generan polvo y, por tanto, las protogalaxias jóvenes podrían sofocar su propia emisión Lyman-alfa. Sin esta línea de emisión característica cuesta reconocer las galaxias jóvenes o medir sus corrimientos hacia el rojo. No obstante, se ha cosechado algún éxito utilizando filtros especiales diseñados para detectar la emisión Lyman-alfa del hidrógeno.

En el campo que circunda al cuásar 0000-263, llamado así por sus coordenadas, esta técnica condujo a un descubrimiento apasionante, apodado, no muy expresivamente, “G2”. Fue una de las primeras galaxias de apariencia normal que se descubriera con un corrimiento hacia el rojo mayor de tres. Las mediciones espectroscópicas confirmaron su distancia, y observaciones posteriores llevaron a la identificación de varias otras galaxias en el mismo campo, con corrimientos hacia el rojo igualmente altos; una de ellas podría ser responsable de la absorción Lyman-alfa que se ve en el espectro del cuásar. Las imágenes profundas del Hubble proporcionaron la primera panorámica nítida de las galaxias cuando el universo contaba entre un 10 y un 25 por ciento de su edad actual. G2 también parece tener una forma esferoidal, como una versión azul y más joven de las elípticas encontradas en el cúmulo 3C324, mencionadas antes. Las progenitoras de las galaxias elípticas que obser-

5. LAS GALAXIAS HAN VENIDO MADURANDO con el curso evolutivo del universo. Actualmente (*columna inferior izquierda*) la mayoría de las galaxias son elípticas (*arriba*) o espirales (*abajo*). Las imágenes del Hubble, que muestran etapas cósmicas anteriores, cuando el universo contaba con una tercera parte de su edad actual, descubren objetos semejantes a las galaxias elípticas maduras. Su presencia sugiere que las galaxias de este tipo se formaron con rapidez tras la gran explosión. Por el contrario, las galaxias espirales (*fila central e inferior*) tienden a parecer cada vez menos regulares a medida que nos remontamos atrás en el tiempo; su formación y evolución fueron quizá más graduales.





6. LAS ACUMULACIONES SUBGALACTICAS AZULES DEBILES, situadas a unos 11.000 millones de años luz de la Tierra, podrían ser la materia prima a partir de la que se formaron las galaxias actuales. El Hubble encontró estos 18 objetos en la zona norte de la constelación de Hércules, cerca del Dragón. Se cree que estos pequeños cúmulos colisionaron y se fundieron unos con otros hasta generar las galaxias gigantes que observamos hoy.

vamos en la actualidad bien podrían ser del tipo de la G2.

Explosión demográfica

Hace muy poco se ha descubierto, gracias a nuevas estrategias de búsqueda, un tesoro oculto de galaxias en los primeros tiempos del universo. El método más rentable no aprovecha la emisión Lyman-alfa, sino que se basa en un rasgo de color que comparten todas las galaxias lejanas. Aunque la causa vuelve a ser el gas de hidrógeno, el mecanismo difiere. El hidrógeno, omnipresente lo mismo en las galaxias que en el espacio intergaláctico, absorbe intensamente toda la luz ultravioleta más azul que cierta longitud de onda. El efecto que ello ejerce sobre la luz emitida por una galaxia joven es muy llamativo: su espectro se corta bruscamente; es una característica espectral cromática inconfundible. Vista a través de varios filtros, una galaxia distante se observará en las longitudes de onda de color rojo o verde, pero desaparecerá en las imágenes más azules.

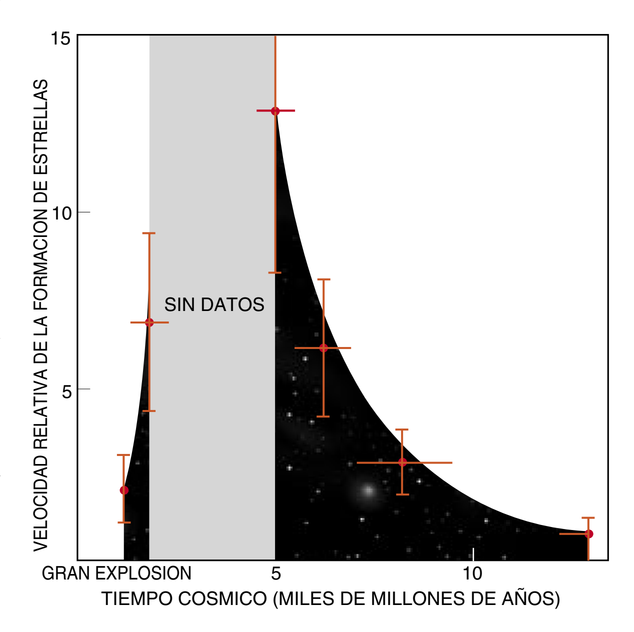
Los nuevos trabajos ponen de manifiesto que estas galaxias "con apagones ultravioletas" son muy comunes en las imágenes astronómicas más profundas: aparecen por todo el firmamento y, en sólo dos años, los rastreos sistemáticos llevados a cabo han identificado centenares de ellas. Sus colores azules sugieren, de nuevo, que en su interior se están formando estrellas a gran velocidad. Sin embargo, sólo algunas de estas galaxias muestran líneas de emisión Lyman-alfa intensas, lo que refuerza la idea de que el polvo podría extinguir esas emisiones con facilidad. La confirmación de los desplazamientos al rojo sin la aportación de la emisión Lyman-alfa es harto difícil. Pese a ello, los espectros tomados con el telescopio Keck lo han conseguido para más de un centenar de galaxias con desplazamientos al rojo entre 2 y 3,8, de las cuales unas veinte (hasta la fecha) caen en el HDF.

Está claro que ya había en el universo una población importante de galaxias cuando éste sólo tenía unos miles de millones de años. Se ignora la relación entre tales objetos y las galaxias del estilo de la Vía Láctea. ¿Podrían estas esquivas galaxias primigenias acaso ser los antepasados directos de las espirales y elípticas que observamos en la actualidad? ¿Está su colapso generando su primera generación de estrellas?

Las imágenes del HDF muestran que muchos de estos objetos eran menores que nuestra Vía Láctea. En un buen número de ellos hay nudos y condensaciones brillantes que se extienden a lo largo de miles de años luz; estas estructuras se asemejan a las grandes regiones de formación estelar que encontramos en otras galaxias cercanas. Muchas tienen compañeras muy cercanas, lo que sugiere que se forman a partir de la fusión de galaxias pequeñas o incluso a partir de fragmentos subgalácticos.

De acuerdo con una de las teorías que se barajan, tales fragmentos, de una décima parte del tamaño de la Vía Láctea, se formaron en las etapas iniciales; además, la mayoría de las galaxias actuales resultarían de la fusión de estas acumulaciones menores. La densidad media del universo a un corrimiento hacia el rojo de $z = 3{,}5$ era 90 veces superior que la actual; la probabilidad de que se produjeran encuentros y fusiones resultaba, por tanto, mucho mayor. Las galaxias podrían haberse construido de forma gradual mediante estos procesos frecuentes de fusión, con la ayuda de la acumulación de materia debida a la atracción gravitatoria, hasta alcanzar los tamaños y masas que presentan ahora.

Combinando los datos tomados de las galaxias cercanas con los que salen de los rastreos de los grandes corrimientos hacia el rojo y del método de las galaxias con apagón ultravioleta se ha podido esbozar la historia global de la generación estelar a partir de los primeros miles de millones de años de la historia del universo. La imagen que se va perfilando



7. LA FORMACION ESTELAR procedía con rapidez hace 12.000 millones de años, cuando el universo era joven, tal y como muestra este gráfico basado en las observaciones de las galaxias lejanas mediante el Hubble y telescopios terrestres. Hace unos 9000 millones de años el ritmo de la formación estelar comenzó a disminuir drásticamente.



8. LAS LENTES GRAVITATORIAS han permitido ver el interior de las galaxias débiles. Los numerosos objetos azules, como anillos, que se aprecian en esta foto son imágenes múltiples de la misma galaxia distante. Las galaxias elípticas y espirales amarillas apelotonadas en el centro, llamadas 0024+1654 por su posición en el cielo, poseen un campo gravitatorio enorme, que, por doblar la luz, distorsiona, amplía o duplica las imágenes de los objetos situados detrás.

sugiere que el ritmo de la generación estelar aumentó mucho a medida que el universo se expandía durante el primer 20 o 30 por ciento de su edad actual. Llegó a su máximo, quizá cuando el corrimiento hacia el rojo estaba entre 2 y 1, época escasamente explorada por las observaciones. Desde entonces se ha producido un descenso gradual.

En la actualidad, si se toma el promedio de todas las galaxias, se forman estrellas a una velocidad menor de una décima parte de la máxima a la que llegaron a generarse. El universo, por tanto, parece haber entrado en una sosegada madurez. Este cuadro es incompleto y susceptible de revisión a medida que se efectúen nuevas observaciones, pero su mera existencia prueba los sorprendentes avances realizados en el campo de la cosmología observacional durante los últimos diez años.

Nuevas direcciones

¿Cómo estudiarán en el futuro los astrónomos el universo a valores de z muy elevados? Una de las posibilidades más apasionantes consiste en sacar partido del fenómeno de las “lentes gravitatorias”. Las grandes masas, la de un denso cúmulo galáctico, por ejemplo, pueden curvar, ampliar y distorsionar la imagen de los objetos que estén más allá; la de una galaxia débil situada tras un cúmulo así puede ampliarse y estirarse hasta crear un arco gigante. De esa forma se revelan detalles morfológicos que trascienden los límites de capacidad de los mejores telescopios.

Las lentes gravitatorias también hacen que las galaxias distantes aparezcan mucho más brillantes, lo que facilita su análisis espectroscópico. Al emplear estas lentes naturales para aumentar la resolución del Hubble, se han obtenido imágenes asombrosas de arcos gravitatorios, y se ha confirmado que algunos son galaxias intrínsecamente débiles con desplazamientos al rojo equiparables a los de la población con apagón ultravioleta de la que se ha hablado antes.

Asimismo, los telescopios e instrumentos actualmente en fase de construcción ampliarán los trabajos aquí descritos y se abordarán muestras mayores y corrimientos hacia el rojo superiores. Se está preparando una batería de telescopios gigantes en montañas repartidas por el globo. En el mes de febrero del año en curso, los astronautas estadounidenses volvieron al Hubble para instalarle dos instrumentos que aumentarán su poder y abrirán nuevas ventanas al universo remoto. Ha rastreado hace poco el HDF el Observatorio Infrarrojo Espacial (ISO) europeo, un satélite que escudriña las grandes longitudes de onda en las que puede que las galaxias lejanas, ricas en polvo, emitan la mayor parte de su energía.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A SHORT HISTORY OF THE UNIVERSE. Joseph Silk. *Scientific American Library*, W. H. Freeman & Co., 1994.

FAINT BLUE GALAXIES. Richard S. Ellis en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 35, 1997. (En prensa).

Para visitar el Hubble Deep Field (STScI) en el WWW, consultar http://www.stsci.edu/ftp/science/hdf/hdf.html.

El factor humano en los accidentes aéreos

Más de dos tercios de los accidentes de aviación se deben a errores cometidos por el hombre. Una preparación complementaria que mejora el rendimiento de la tripulación puede reducir los errores trágicos

Robert L. Helmreich

En 1978 un DC-8 de United Airlines con 189 pasajeros a bordo se estrelló mientras intentaba aterrizar en Portland. Inmediatamente después de sacar el tren de aterrizaje en la maniobra de aproximación al aeropuerto, los pilotos advirtieron que no se había encendido el indicador luminoso. Este fallo presagiaba que el conjunto de ruedas y su estructura soporte podrían destrozarse en el aterrizaje, con el incendio consiguiente y riesgo para la integridad de los pasajeros. En lugar de continuar la aproximación, la tripulación decidió volar en un circuito de espera mientras determinaban si el tren de aterrizaje estaba realmente en peligro. A medida que pasaba el tiempo el combustible se iba agotando. El comandante, preocupado por el indicador, se equivocó al evaluar la situación global y al ignorar los avisos repetidos del ingeniero de vuelo acerca del escaso combustible remanente. Cuando el capitán reaccionó e intentó aterrizar, era demasiado tarde. Se pararon los cuatro motores y el avión se estrelló en una zona arbolada cerca de la pista de aterrizaje, muriendo 10 personas.

ROBERT L. HELMREICH es profesor de psicología en la Universidad de Texas en Austin, desde 1966. Dirige un proyecto de investigación sufragado en su origen por la Administración Nacional de la Aeronáutica y el Espacio y apoyado ahora por la Administración Federal de Aviación norteamericana. El proyecto en cuestión examina las prestaciones individuales y en equipo de tripulaciones de vuelo, así como la influencia en cabina de la cultura de la compañía aérea y de la nación. Además de las personas citadas en el texto, el grupo de investigación de la Universidad de Texas lo conforman John A. Wilhelm, John Bell, Roy Butler, Peter Connelly, William E. Hines, James Klinect, Lou E. Montgomery, Sharon Jones Peeples, Bryan Sexton y Paul J. Sherman.

La investigación sobre el accidente reveló que el único problema del avión era que la luz de aviso estaba averiada. El error del comandante, en aquella situación de extrema tensión psicológica, no fue su intento de afrontar un problema mecánico que implicaba riesgo de vidas humanas, sino su despreocupación de otros aspectos críticos del vuelo de una aeronave.

Este accidente coincidió con unas investigaciones llevadas a cabo por la NASA sobre las causas de los accidentes desde la introducción del muy fiable avión a reacción a finales de los años cincuenta. La investigación demostró que en más del setenta por ciento de estos accidentes estaba involucrado algún tipo de error humano. Y lo más sorprendente aún: la mayoría de esos errores no se debían a defectos técnicos, sino a fallos en la comunicación, trabajo en equipo y toma de decisiones.

La aviación comercial se conmocionó al enterarse de que tripulaciones bien entrenadas y técnicamente preparadas podrían poner en peligro la aeronavegabilidad por culpa de fallos en la comunicación e interacción entre los miembros de la cabina; en ese ámbito, ni la Administración Federal de Aviación norteamericana (FAA) ni los entes reguladores de la aviación en otros países exigen entrenamiento previo ni exámenes formales.

Para paliar esa laguna se desarrollaron programas, conocidos bajo la denominación genérica de Gestión de Recursos en Cabina (CRM, del inglés “Crew Resource Management”), centrados en el equipo y los aspectos de liderazgo en el pilotaje de aeronaves. Los programas, aunque fundamentalmente dirigidos a la tripulación de cabina (piloto, copiloto e ingeniero de vuelo), incluían también a auxiliares de vuelo, controladores aéreos y personal de refuerzo. Los CRM se extienden más allá de la cabina porque otros profesionales de la aviación tienen también su papel destacado en garantizar la seguridad del vuelo.

Aprendiendo de los errores

Un objetivo fundamental de la CRM consiste en conseguir que los pilotos trabajen en equipo para reducir los errores. La presencia de dos o tres tripulantes en cabina proporciona cierto grado de redundancia; uno puede detectar algo que se le escapa a otro. Pero la diversidad de criterios sobre las condiciones de un vuelo resulta estéril si no se comparte la información. Gracias a una preparación complementaria, un entrenamiento ceñido a las limitaciones propias del sujeto (pensemos en la influencia de la tensión en la capacidad para captar información y tomar decisiones), los pilotos y el resto del personal de vuelo adquieren una conciencia mayor de la eficacia de la colaboración para prevenir el error.

La CRM se funda en la psicología social, organizativa y del conocimiento, así como en la investigación del factor humano, que aborda la interacción entre la persona y la máquina. Para cada línea aérea se diseñan a medida sus propios programas. La línea aérea, con la ayuda de expertos externos a la compañía,

comienza por realizar un análisis de la organización para descubrir posibles impedimentos que obstruyeran esa preparación complementaria. A este respecto, puede recabar las opiniones de los pilotos acerca de los hábitos de la línea aérea, información que a veces permite identificar conductas poco seguras incrustadas en una organización. Estas inspecciones se complementan con observaciones del comportamiento de las tripulaciones de la línea aérea durante vuelos rutinarios.

El análisis de los errores cometidos por los pilotos aporta un conocimiento más amplio de los problemas experimentados por una línea aérea. Para recopilar este tipo de datos, la compañía debe adoptar una política no punitiva en el reconocimiento de errores, a fin de incentivar a los pilotos a compartir sus experiencias. Cierta línea aérea que instituyó esta política recibió de sus pilotos más de 5000 informes en 21 meses. El volumen de informes no indica que se tratara de una línea insegura; antes bien, pone de manifiesto el número de errores que ocurren durante vuelos normales, que se detectan y corrigen sin mayores consecuencias.

Un programa CRM típico comienza con un seminario donde se imparten conocimientos básicos sobre la dinámica de grupo, la naturaleza del error humano y los problemas que plantea el trabajo con la máquina. Se reunió a miembros de una tripulación para que revisaran casos de accidentes que resaltaran la importancia de las interacciones entre miembros de la tripulación. Un ejemplo que se cita con frecuencia es el del accidente de un Boeing 737 de Air Florida en 1982 cerca del aeropuerto nacional de Washington. La tripulación despegó con hielo en las alas y en un sensor, lo que motivó una lectura demasiado alta en los indicadores de velocidad. Debido a esa información errónea de velocidad, se aplicó a los motores una potencia menor de la necesaria. Como demuestra la siguiente conversación, el copiloto detectó un problema relativo a las indicaciones de los instrumentos y a la potencia empleada, pero no expresó con diafanidad sus dudas.

Copiloto: ¡Ah! Esto no va bien.
Comandante: Sí va bien, vamos a 80 (refiriéndose a la velocidad respecto a tierra)
Copiloto: No, no creo que vaya bien. Ah, bueno, puede ser.
Comandante: Ciento veinte.
Copiloto: No lo sé.

Poco después del despegue, el aparato entró en pérdida y se estrelló contra un puente sobre el río Potomac. Los accidentes son también esenciales en las situaciones ante las que se enfrentan los pilotos en los simuladores de vuelo. Las sesiones de simulador forman parte del entrenamiento anual para reforzar conceptos básicos de la CRM.

Más allá de la palanca y los pedales

Los simuladores de alta fidelidad incorporan una cabina con los instrumentos y controles de vuelo, la sensación del movimiento y una representación visual del entorno fuera de las ventanas de la cabina. La CRM ha ampliado las aplicaciones de los simuladores. En un comienzo

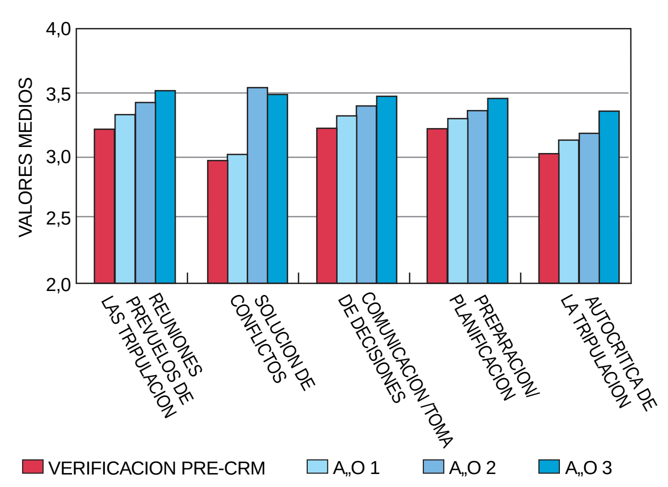


1. EL ACCIDENTE de un Boeing 737 de Air Florida en el río Potomac cerca de Washington, en 1982, se produjo después de que el comandante desoyera las advertencias del copiloto acerca de que el avión avanzaba con excesiva lentitud durante la fase de aceleración antes del despegue.









2. LOS SIMULADORES DE VUELO de alta fidelidad (*arriba, a la izquierda*) permiten a los pilotos llevar a cabo entrenamientos de gestión de recursos en cabina (CRM) (*arriba, a la derecha*) para potenciar su capacidad de trabajar en colaboración. Un instructor (*arriba, a la derecha, en primer término*) programa en un ordenador situaciones de vuelo límites: por ejemplo, el fallo de un motor. Posteriormente, los pilotos asisten a reuniones en las que se revisan las prestaciones del grupo (*abajo, a la izquierda*). En un estudio acerca del impacto de la CRM en una línea aérea se ha demostrado una mejora gradual en las prestaciones (*abajo, a la derecha*).

se empleaban sólo para enseñar y evaluar las facultades de vuelo de los pilotos (técnicas de “palanca y pedales”). Hoy en día permiten a las tripulaciones autoevaluarse en problemas complejos —desde malas condiciones atmosféricas hasta fallos mecánicos— que no pueden resolverse siguiendo sencillamente un procedimiento recogido en el manual de vuelo. (En el marco de la CRM, el trabajo con simuladores se denomina entrenamiento de vuelo orientado a líneas regulares, o LOFT.)

Durante una sesión LOFT, la tripulación entera efectúa un vuelo completo, desde el mismo momento de rellenar los formularios al uso y breves reuniones. Dirige la sesión un instructor que ha recibido entrenamiento especial para analizar comportamientos de grupo. El instructor interviene también en el papel de controlador aéreo y de asistente de vuelo en contacto con la cabina.

Podría programarse el simulador para que falle un motor y observar si la tripulación se obceca con este problema e ignora otros factores (combustible o condiciones atmosféricas), tal y como hizo el comandante del DC-8 de Portland. Cada miembro de la tripulación es animado a alcanzar un conocimiento global de cómo se desarrolla un vuelo y a comunicar cualquier motivo de preocupación que pudiera surgir. La sesión de entrenamiento no es un examen, por lo que la tripulación se siente libre de experimentar con nuevos comportamientos; un comandante, por ejemplo, acostumbrado a controlarlo todo de forma rígida y personal podría solicitar consejo al copiloto. Componente importante del LOFT es la reunión postsimulación; en ella se revisan las grabaciones en vídeo de la sesión de simulador, hayan sido deficientes o ejemplares los comportamientos de la tripulación.

Amén de ayudar a los pilotos a interactuar con sus colegas, la CRM facilita la familiarización con el ordenador que gobierna el vuelo, o “miembro electrónico de la tripulación”. Los cursos demuestran que la automatización de los sistemas de vuelo de una aeronave, desde la navegación hasta el aterrizaje, no ha resultado ser la panacea antierrores que auguraban los ingenieros aeronáuticos. La verdad es que la automatización ha resaltado la necesidad de una comunicación más fluida entre los miembros de la tripulación. Algunos de los aviones de línea más avanzados han sufrido accidentes por culpa del abuso de sistemas automatizados.

Los sistemas de vuelo computerizados suponen una serie de desafíos para las tripulaciones. A pesar de que la técnica puede guiar una aeronave con precisión, un viaje largo bajo el control del ordenador de vuelo puede ser tedioso y complicar el mantenimiento de un alto nivel de vigilancia. Además, los ordenadores de vuelo programados pueden generar resultados confusos. No son infrecuentes exclamaciones del tenor siguiente: “Pero, ¿qué está haciendo? ¿Qué se

propone ahora?" Considerados "inteligentes", en la práctica los sistemas de vuelo computerizados ejecutarán a veces comandos erróneos con consecuencias trágicas.

En aeronaves más antiguas y menos automatizadas, jocosamente denominadas "reactores jurásicos", las acciones sobre los mandos de vuelo efectuadas por un miembro de la tripulación para variar la velocidad o la altitud son detectadas de inmediato por los otros. Todos asisten a la manipulación de los instrumentos de vuelo. Cualquier cambio se refleja en un indicador del panel de control. En aeronaves automatizadas, un miembro de la tripulación introduce un cambio —por ejemplo, de altitud— en un teclado. Esa orden puede resultar indetectable para otro miembro de la tripulación, con lo que se elimina un importante método cruzado de contrastación. De lo que se infiere que los aviones dotados con equipos automatizados avanzados requieren un mayor grado de comunicación entre los miembros de la tripulación para asegurar que todos sepan lo que está sucediendo. En un escenario ideal los pilotos deberían verbalizar cada entrada por teclado para que los otros puedan detectar los errores antes de que ocurra un desastre.

La automatización comporta otro efecto negativo: incrementa la carga de trabajo de los pilotos en los instantes en que deberían prestar atención al tráfico aéreo y a la navegación en los

Un trabajo en equipo que salvó vidas

El vuelo de un DC-10 de United Airlines sobre el Medio Oeste norteamericano en 1989 constituye un ejemplo socorrido por las lecciones que del mismo se extraen. La tripulación resolvió diversos problemas simultáneos mientras se enfrentaba a un inminente desastre. Durante el vuelo 232 de Denver a Chicago, el motor central se desintegró, rompiendo las conducciones hidráulicas. El fluido hidráulico a presión es necesario para accionar el timón de dirección, los alerones y otras superficies de mando que permiten controlar el avión. Debido a este fallo, los pilotos no podían controlar la dirección en la que se movía el avión.

En esta horrible situación los tres miembros de la tripulación fueron un modelo de equipo, incluso al recabar la ayuda de otro piloto que volaba como pasajero en primera clase. Conjuntamente idearon una técnica para dirigir el avión aumentando y disminuyendo el empuje de los dos motores operativos. Pese a que el avión se estrelló contra el suelo a poca distancia de la pista, sobrevivieron muchos pasajeros. En el informe del accidente, la Junta Nacional para la Seguridad del Transporte de los Estados Unidos destacó la actuación de la tripulación y mencionó la importancia de su entrenamiento en gestión de recursos en cabina (CRM).

Con el fin de profundizar en el estudio de este caso, Steven C. Predmore, hoy en Delta Airlines, analizó las grabaciones de voz en cabina mientras preparaba conmigo su tesis doctoral en la Universidad de Texas. Predmore clasificó las conversaciones entre la tripulación en "unidades conceptuales", que permitían cuantificar una idea simple, un intento o una acción.

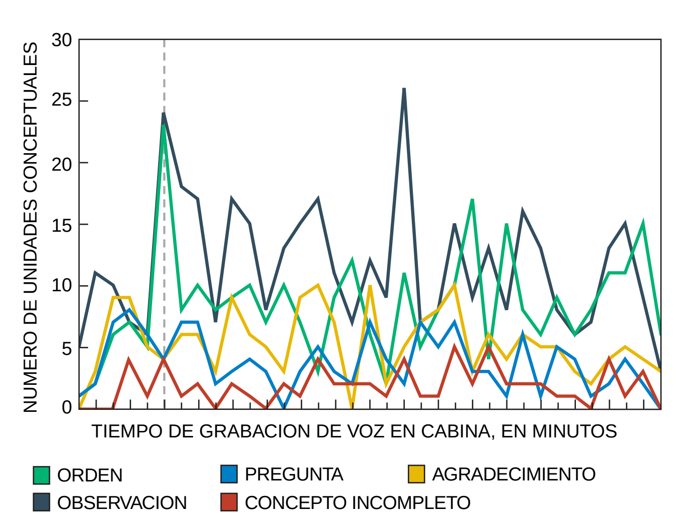
La tripulación tuvo que simultanear el control del avión, la evaluación de los daños, la elección de un lugar de aterrizaje y la preparación del personal de cabina y de los pasajeros para un aterrizaje de emergencia. A diferencia de la tripulación que se estrelló en Portland, ésta nunca se concentró en una tarea específica. Cubrió múltiples tareas simultáneamente durante los 34 minutos de grabación.

También los miembros de la tripulación establecieron prioridades rigurosas, abandonando tareas que podrían distraerles. Así, unos 12 minutos antes del impacto, la tripulación desplazó su atención de las acciones correctivas y la evaluación de los daños a la realización del descenso. (De los 296 pasajeros a bordo, murieron 111; todos los pilotos sobrevivieron.)

Las investigaciones de Predmore proporcionaron el volumen exacto de comunicaciones que tuvo lugar entre los miembros de la tripulación. En el punto álgido, se transmitieron 59 unidades conceptuales en un solo minuto, algunas de brevedad apresurada: "de acuerdo". La media global fue de 31 por minuto, aproximadamente el doble del nivel típico alcanzado durante los períodos más delicados de un vuelo rutinario. La naturaleza de las interacciones —un esfuerzo continuo para describir la situación en cada momento— demuestra cómo la tripulación se las arregló para un intercambio constante de información de los acontecimientos que se desarrollaban y de las decisiones tomadas en consecuencia.

No sólo se dieron órdenes correctas. Los componentes más jóvenes de la tripulación sugerían con entera libertad opciones alternativas. En toda la transcripción aparecieron intercalados retazos de conversación social, que proporcionaban ayuda emocional o se interesaban por el nivel de ansiedad experimentado por los demás; estas conversaciones demostraron ser un medio eficaz contra el estrés abrumador soportado por la tripulación.

—R.L.H.



EL ANALISIS MINUTO A MINUTO de la grabación de voz en cabina muestra una comunicación constante entre los miembros de la tripulación antes de que se estrellara el DC-10 en Sioux City, en 1989. Los tipos de interacción se denominaron "unidades conceptuales". El número total de unidades alcanzó un máximo de 59 durante el quinto minuto (*línea gris*). Este número es la suma de todas las comunicaciones en ese minuto.

congestionados cielos de los aeropuertos. Por ejemplo, un cambio en la pista asignada para el aterrizaje puede requerir numerosas entradas por teclado en el ordenador de vuelo, que controla la velocidad, dirección de vuelo y altitud. Cuando he volado como observador en la cabina de aeronaves automatizadas, he visto a ambos pilotos mirar hacia abajo y reprogramar en el ordenador la aproximación mientras las pistas del aeropuerto se distinguían con toda nitidez desde las ventanas de cabina. La desconexión de la automatización les podría haber permitido alcanzar la pista sin sobresaltos, prestando atención al tráfico y a otras amenazas en un espacio aéreo congestionado.

La CRM intenta que los pilotos consideren los sistemas automatizados de cabina un miembro más de la tripulación, con sus valores y sus limitaciones propias. En el simulador los pilotos podrían habérselas con situaciones en que su capacidad para abordar ciertas tareas y resolverlas estuviera mermada a no ser que desconectaran los sistemas automáticos.

La CRM va incluso más lejos y proporciona a las tripulaciones el conocimiento de las claves de la automatización. Cuando un piloto entra en la cabina arrastra el bagaje de tres tipos de hábitos: los profesionales de los pilotos, los comerciales de una línea aérea y los de su idiosincrasia nacional. Todos los condicionamientos afectan a su rendimiento. Ashleigh C. Merritt, miembro de nuestro grupo de la Universidad de Texas en Austin y estudiosa durante 20 años de las prestaciones en equipo y de la CRM, investigó esos tres tipos de hábitos en su tesis de doctorado.

Llegó a la conclusión de que la mentalidad profesional de los pilotos está muy arraigada; recuérdese el profundo individualismo diáfanamente retratado por Tom Wolfe en *The Right Stuff*. (El libro relata la vida de los pilotos de prueba que rompieron la barrera del sonido y de los astronautas de los primeros programas espaciales tripulados.) Además de sentirse muy orgullosos de su profesión, muchos pilotos rechazan de plano que nada les haga perder sus nervios de acero; no están dispuestos a reconocer que la fatiga y el peligro súbito pueden nublar sus juicios y retardar sus tiempos de respuesta. Esta sensación de invulnerabilidad se manifiesta en un deseo de representar el papel de aviador solitario con larga bufanda blanca luchando contra los elementos. Haciendo hincapié en los límites de las prestaciones humanas y en la inevitabilidad del error, la CRM se esfuerza por cambiar esos prejuicios arraigados y conseguir que los pilotos reconozcan que el trabajo en equipo ayuda a evitar errores cuyo origen está en una tensión extrema y en una gran carga de trabajo.





3. LA INSTRUMENTACION EN CABINA de un avión antiguo (*arriba*) permite al piloto observar fácilmente los cambios de velocidad o de dirección de la aeronave. En un prototipo reciente (*abajo*), el piloto teclea en un ordenador el curso a seguir después del despegue, tal y como está haciendo el miembro de la tripulación del asiento izquierdo. Pero esa orden pudiera pasarle inadvertida al copiloto.

Los hábitos de la línea aérea

Los hábitos empresariales de una línea aérea refuerzan o disminuyen también la seguridad. Es improbable que el entrenamiento puro genere cambios duraderos si una aerolínea no se compromete con la CRM. (El trabajo inicial de los consultores externos se centra sobre todo en analizar los procedimientos de la línea aérea y sus métodos de gestión.) La investigación del accidente de un Fokker F-28 de Air Ontario que se estrelló en Canadá en 1989 después de despegar con hielo en las alas, durante una fuerte nevada, proporciona un ejemplo de malos hábitos de una organización. Los pilotos estaban acostumbrados a mirar por la ventanilla para ver si la nieve había desaparecido cuando el avión había alcanzado 80 nudos en la aceleración del despegue. Esta comprobación no estandarizada daba buen resultado en aviones más lentos, con turbohélices, cuyas alas rectas eran fácilmente observables desde la cabina. Pero no detectaba la presencia de hielo en las alas con flecha de un avión a reacción.

Los datos de Merritt, obtenidos a partir de encuestas a más de 13.000 pilotos en 16 países, demostraron, asimismo, que el comportamiento en cabina estaba influenciado por la nacionalidad. Es un mito la percepción popular de la cabina como un lugar exento de peculiaridades nacionales, donde todos los pilotos de todos los países efectúan las mismas tareas en los mismos aviones de forma exactamente igual. Difieren significativamente de una mentalidad a otra las percepciones de los papeles de los comandantes y de los miembros de la tripulación más jóvenes y las actitudes acerca de la importancia de reglas y procedimientos escritos. En una encuesta correspondiente a un país asiático, solamente el 36 por ciento de los pilotos están de acuerdo con que los miembros de la tripulación deben expresar en voz alta sus dudas relativas a la seguridad del vuelo, mientras que este número sube hasta el 98 por ciento en un país occidental.

Nuestras investigaciones sugieren que ninguna mentalidad nacional concreta configura la tripulación "ideal". La tripulación óptima debería ser la dispuesta a un trabajo en equipo, con un liderazgo de talante consultivo en el que los miembros más jóvenes hablaran para compartir información y recomendaran acciones alternati-

¿Puede la CRM reducir los errores humanos en un quirófano?

Un neurocirujano eminente insiste en intervenir en el lado no afectado del cerebro de una mujer, a pesar de las vagas protestas de un médico residente que ha detectado el error. En otro quirófano, un cirujano y un anestesista solucionan sus diferencias a puñetazos mientras un paciente anciano espera anestesiado en la mesa de operaciones.

David M. Gaba, de la Universidad de Stanford, Hans-Gerhard Schaefer, de la Universidad de Basilea, y otros médicos han reconocido los paralelismos entre los problemas de comunicación interpersonal en la cabina de un avión y los que aparecen en una sala de operaciones. Sus trabajos se han plasmado en el desarrollo de programas de entrenamiento en factores humanos para equipos de cirujanos y anestesistas. Este tipo de preparación se ha extendido por hospitales de todo el mundo.

El modelo de Basilea es el que remeda con mayor fidelidad el método aplicado en aviación. El programa está montado alrededor de un simulador de quirófano en el que un maniquí instrumentado y controlado por ordenador (apodado Guillermo Tell) puede ser anestesiado y someterse a una laparoscopia abdominal. El "paciente" respira, tose, responde a la inoculación de fármacos y está dotado del hígado de un cerdo recientemente sacrificado, con circulación sanguínea (artificial).



EN LAS OPERACIONES QUIRURGICAS simuladas, efectuadas por un equipo médico de Gran Bretaña entrenado con técnicas derivadas de la gestión de recursos en cabina (CRM) para pilotos, se utiliza un maniquí como paciente.

Durante la operación, pueden introducirse en el ordenador varias crisis —hemorragia, colapso pulmonar o parada cardiaca— que incrementan la necesidad de toma conjunta de decisiones. La sesión, grabada en vídeo, se estudia en una reunión posterior. En un futuro, un adiestramiento similar podría generalizarse a salas de emergencia, equipos de emergencia de helicópteros y ambulancias, unidades de cuidados intensivos y salas de exploración. —*R.L.H.*

vas. La mejor tripulación seguiría procedimientos normalizados, pero podría utilizar su buen juicio para desviarse de reglas establecidas en interés de la seguridad. El reto que se les plantea a los diseñadores de los programas CRM consiste en armonizar el entrenamiento con los hábitos locales.

Cualquier línea aérea que lleve a cabo un programa completo de CRM debe prepararse para emplear una importante cantidad de tiempo y recursos. Por tanto, es legítimo preguntarse si el entrenamiento alcanza su propósito: reducir los errores y mejorar el rendimiento del equipo. La pregunta no admite una respuesta sencilla. Debido a que la aviación comercial es extremadamente segura, se necesitarán muchos años para recoger estadísticas adecuadas que determinen si los programas de CRM han reducido la frecuencia total de accidentes aéreos. Pero existen otros indicadores que permiten juzgar su utilidad. Contamos ya con datos del seguimiento de más de 8000 vuelos en las principales líneas aéreas. En una línea aérea de la que hemos recopilado datos anuales durante un periodo de cuatro años, hemos detectado mejoras persistentes en la distribución de la carga de trabajo, entre otros factores.

Basándose en las pruebas acumuladas del valor de la CRM, la FAA ha terminado por imponer el entrenamiento obligatorio para las tripulaciones de vuelo en todas las líneas aéreas de cualquier tamaño. Muchas aerolíneas han iniciado cursos compartidos de CRM para pilotos y asistentes de vuelo, donde se aborda la coordinación de las actividades en las cabinas de pilotaje y de pasaje durante las emergencias. La FAA ha desarrollado también programas CRM para controladores aéreos. Y la Organización Internacional de Aviación Civil, entidad dependiente de las Naciones Unidas y que regula la aviación en todo el mundo, exige la CRM para todas las líneas con vuelos internacionales.

A pesar de que parecen claros los potenciales beneficios de la CRM, un pequeño grupo de pilotos, en torno al 5 por ciento, rechaza sus enseñanzas. Los pilotos refractarios suponen una seria amenaza para la seguridad. Las líneas aéreas han respondido poniendo cada vez un mayor énfasis en seleccionar pilotos que sean, no sólo técnicamente competentes, sino también capaces de trabajar en equipo.

Las enseñanzas extraídas del rendimiento de las tripulaciones en vuelo sometidas a estrés se están generalizando a otras profesiones de alto riesgo: quirófanos, barcos y salas de control de centrales nucleares y plantas petroquímicas. La utilización de esta técnica fuera de la aviación avala sus posibilidades como estrategia de entrenamiento eficaz en cualquier entorno donde un equipo de profesionales interactúe con un sistema técnico complejo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

WHY CREW RESOURCE MANAGEMENT? EMPIRICAL AND THEORETICAL BASES OF HUMAN FACTORS TRAINING IN AVIATION. R. L. Helmreich y H. C. Foushee en *Cockpit Resource Management*. Dirigido por E. L. Wiener, B. Kanki y R. Helmreich. Academic Press, 1993.

TEAM PERFORMANCE IN THE OPERATING ROOM. R. L. Helmreich y H.-G. Schaefer en *Human Error in Medicine*. Dirigido por M. S. Bogner. Lawrence Erlbaum Associates, 1994.

HUMAN FACTORS ON THE FLIGHTDECK: THE INFLUENCE OF NATION AND CULTURE. Ashleigh C. Merritt y Robert L. Helmreich en *Journal of Cross-Cultural Psychology*, vol. 27, n.º 1, páginas 5-24; 1 de enero, 1996.

Página principal en la World Wide Web del Aerospace Crew Research Project de la University of Texas at Austin: htpp://www.psy.utexas.edu/psy/helmreich/nasaut.htm

El espacio-tiempo fractal

La teoría de la relatividad de escala generaliza el principio de la relatividad enunciado por Einstein. La mecánica cuántica pasa a ser una consecuencia de la relatividad

Laurent Nottale

Se contrapone hoy la física clásica, que se ocupa de los fenómenos a gran escala, a la cuántica, que trata de los microscópicos. El objeto de la teoría de la relatividad de escala es poner fin a este antagonismo, deduciendo la mecánica cuántica de una extensión del principio de la relatividad que gobierna la física clásica. Esta manera de proceder cambia profundamente el marco de nuestro pensamiento.

La teoría de la relatividad general es el apogeo de la física clásica. El principio de la relatividad, tal y como lo enunció Albert Einstein, estipula que las leyes de la naturaleza se apliquen en todos los sistemas de coordenadas, sea cual sea su movimiento. Pero, ¿qué son las leyes de la naturaleza? El físico sólo puede hacer de su existencia un postulado e intentar acercarse a ellas mediante las ecuaciones.

Desde Newton, se utiliza el método diferencial para expresar los fenómenos físicos con ecuaciones: se descompone un objeto complejo en sus partes más simples. Esta simplicidad permite una descripción local, diferencial, que, tras la integración, aporta las propiedades globales del objeto.

Este método pierde toda su eficacia si las partes, en vez de más simples, son diferentes o más complejas que el objeto del que se ha partido. Es lo que pasa en la física de partículas: cuando se mira un objeto con un acelerador de partículas, que a esas escalas reemplaza al microscopio, aparecen estructuras nuevas a medida que crecen los aumentos. La mecánica cuántica describe este comportamiento. El principio de la relatividad general de Einstein, fundado sobre la diferenciabilidad, es, pues, por naturaleza, incapaz de dar cuenta de los efectos cuánticos, que se basan en la no diferenciabilidad.

El principio de la relatividad de escala generaliza el enunciado de Einstein: las leyes de la naturaleza se aplican sea cual sea el movimiento, y también sea la que sea la escala del sistema de coordenadas. En la relatividad de escala, se reemplazan las magnitudes físicas, como la velocidad y la longitud, por funciones que dependen explícitamente de la precisión de la observación, es decir, de la resolución. Esta se vuelve una variable esencial, inherente al espacio-tiempo, que caracteriza la escala del sistema de coordenadas, como la velocidad caracteriza su movimiento. Las resoluciones espacio-temporales poseen la misma relatividad que el movimiento: así como no se sabría definir un intervalo de longitud o de tiempo de manera absoluta, sólo una relación entre dos escalas tiene sentido.

Cuando se aplica al propio espacio-tiempo esta idea de que las magnitudes físicas dependen explícitamente de la resolución, se llega al concepto geométrico de fractal. Sin previo acuerdo, Garnet Ord y yo mismo propusimos a principios de los años ochenta que las propiedades cuánticas son el resultado de la naturaleza fractal del espacio-tiempo microscópico.

Sistemas de coordenadas

Los filósofos de la Edad Media se preguntaban: ¿por qué se creó el universo en un lugar y momento preciso, y no un poco más a la derecha y algo antes? El principio de la relatividad de Einstein contiene la respuesta a esta pregunta: no hay un sistema de referencia absoluto en el universo, ni temporal, ni espacial, que permita localizar nuestra presencia.

La definición de un sistema de coordenadas pasa en primer lugar por la de un origen. Al ser equivalentes todos los puntos del universo, la posición del origen de un sistema de coordenadas sólo tiene sentido físico con respecto a otro. Ocurre lo mismo por lo que se refiere a la orientación de los ejes: sólo se pueden definir ángulos relativos. Estas propiedades desempeñan un papel fundamental en física: se traducen en forma de simetrías espacio-temporales, la invariancia bajo las traslaciones, temporales y espaciales, y las rotaciones. De estas simetrías se deduce que permanecen invariables en el curso del tiempo la energía, el momento (o cantidad de movimiento) y el momento cinético.

Con Galileo sale a la luz en física la idea de la relatividad. Descubrió el carácter relativo del movimiento inercial (movimiento inercial significa movimiento rectilíneo uniforme). La velocidad caracteriza el movimiento del sistema de coordenadas, pero sólo tiene sentido una diferencia de velocidades. Y esa diferencia sólo cabe definirla mediante un par de objetos, la velocidad, por ejemplo, de una bola con respecto a un plano inclinado, jamás una velocidad absoluta.

Con Henri Poincaré, y sobre todo con Einstein, el concepto de la relatividad toma una nueva amplitud: la física parece capaz de responder, por primera vez, no sólo al “cómo”, sino, en ciertos problemas, al “porqué”. Así, la teoría de la relatividad restringida es la solución general al problema relativista del movimiento inercial, tal y como se pudo plantearlo ya en los tiempos de Galileo: ¿cuáles son las leyes de transformación de los sistemas de coordenadas inerciales (animados de una velocidad relativa constante uno con respecto a otro) que satisfacen el principio de la relatividad? Son las transformaciones de Lorentz, que ligan las cuatro coordenadas (x', y', z', t') en un sistema S', animado de

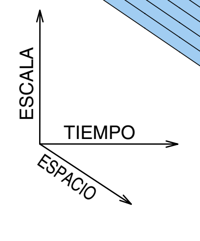
una velocidad v con respecto a las cuatro coordenadas (x, y, z, t) en un sistema S. Para obtener esas leyes, no hace falta añadir al principio de la relatividad galileana el postulado de la invariancia de la velocidad de la luz en el vacío, como hizo Einstein en 1905: en el establecimiento de su forma general aparece una constante c, que se identifica a continuación con la velocidad de no importa qué partícula de masa nula en el vacío. La transformación de Galileo no es entonces más que un caso particular de la transformación de Lorentz, que correspondería a la elección de una constante c infinita. El principio de la relatividad impone las transformaciones de Lorentz y, por tanto, el concepto de espacio-tiempo.

Gravitación

La relatividad general de Einstein, permite una comprensión aún más profunda. No se considera en ella sólo el movimiento a velocidad relativa constante, sino cualquier movimiento acelerado. Esta teoría introdujo en su marco la gravitación gracias al principio de equivalencia. Propuesto por Einstein en 1907, dicho principio enuncia la relatividad del propio campo gravitatorio: un campo de gravitación es localmente equivalente a un campo de aceleración uniforme. La existencia misma de un campo de gravitación no es, pues, absoluta, sino que depende del movimiento del sistema de coordenadas considerado: en un sistema de caída libre en ese campo, la gravitación desaparece por completo. Es lo que los astronautas experimentan como "ingravidez".

Mientras que la teoría newtoniana describe cómo "funciona" la gravitación, la relatividad general explica por qué la gravitación existe y qué es; la generalidad de la descripción obliga a pasar de un espacio-tiempo plano, euclídeo, a un espacio-tiempo curvo. El caso euclídeo es una situación particular que corresponde a la ausencia de gravitación. Finalmente, la gravitación se entiende como el conjunto de manifestaciones de la curvatura.

La trayectoria de una partícula que no está sometida a ninguna fuerza es



1. LAS MAGNIFICACIONES sucesivas de una curva no diferenciable casi doquiera (fractal) hace que aparezcan estructuras cada vez más finas (*a la derecha*). Cuando se generaliza el principio de la relatividad a un espacio-tiempo no diferenciable, la escala se vuelve una característica del sistema de coordenadas. Se representa aquí la que podría ser la variación con la escala de una geodésica de un espacio-tiempo así (el logaritmo de la escala se representa en altura).

una recta recorrida a velocidad constante. Esta recta es la línea más corta, la geodésica, de un espacio-tiempo plano. En la relatividad general, el movimiento de una partícula sujeta a un campo de gravitación arbitrariamente complicado se describe mediante un movimiento local inercial (de velocidad constante) a lo largo de las geodésicas de un espacio-tiempo curvo. Las ecuaciones de Einstein que ligan la curvatura del espacio-tiempo a la distribución de la energía y de la materia son las más generales de las ecuaciones más simples que son invariantes bajo las transformaciones continuas y dos veces diferenciables de los sistemas de coordenadas: la relatividad impone la existencia de la gravitación así como la forma de las ecuaciones que la describen.

Mecánica cuántica

La teoría cuántica se basa en unos axiomas deducidos de las experiencias de la microfísica, de las que no cabía dar cuenta por medio de los conceptos clásicos. En su versión inicial, se trata de una teoría a la que se llega suprimiendo las nociones aparentemente superfluas y ciñéndose lo más posible a las observaciones. Las trayectorias de las partículas no son observables: las trayectorias se suprimen. En numerosas ocasiones se torna imposible predecir la evolución de un sistema. En cambio, se sabe calcular la probabilidad de obtener tal o cual resultado: la teoría, por tanto, es probabilista. La experiencia impone otra propiedad fundamental: la dualidad onda-corpúsculo.

La teoría cuántica resume los tres elementos probabilidad, onda y corpúsculo en un solo objeto teórico, la función de onda. Erwin Schrödinger y Werner Heisenberg escribieron las ecuaciones que la rigen. Esas ecuaciones y el principio de correspondencia, que asocia a las magnitudes observadas los operadores que actúan sobre la función de onda, no se demuestran a partir de un primer principio; se los propone *a priori*.

En la teoría cuántica actual, el espacio-tiempo es plano, lo mismo que en la relatividad restringida. Sin embargo, la evolución de las ideas en física, con Leibniz, Mach y por fin Einstein, ha conducido a que se retire todo sentido físico a la idea de un espacio independiente de su contenido. ¿No es contradictorio, de una parte, admitir la universalidad de las leyes de las propiedades cuánticas, no clásicas, de los objetos microscópicos, y por otra parte que el marco que contiene esos objetos no se modifica por ello en nada?

Richard Feynman, a finales de los años cuarenta, fue el primero que intentó una vuelta parcial a la representación espacio-temporal rehabilitando el concepto de trayectorias cuánticas. Se acercó así a una concepción más geométrica de la realidad cuántica, sin abandonar, pese a ello, su indeterminismo. En su libro de 1965, escrito con A. Hibbs, describe las trayectorias virtuales típicas de una partícula cuántica:

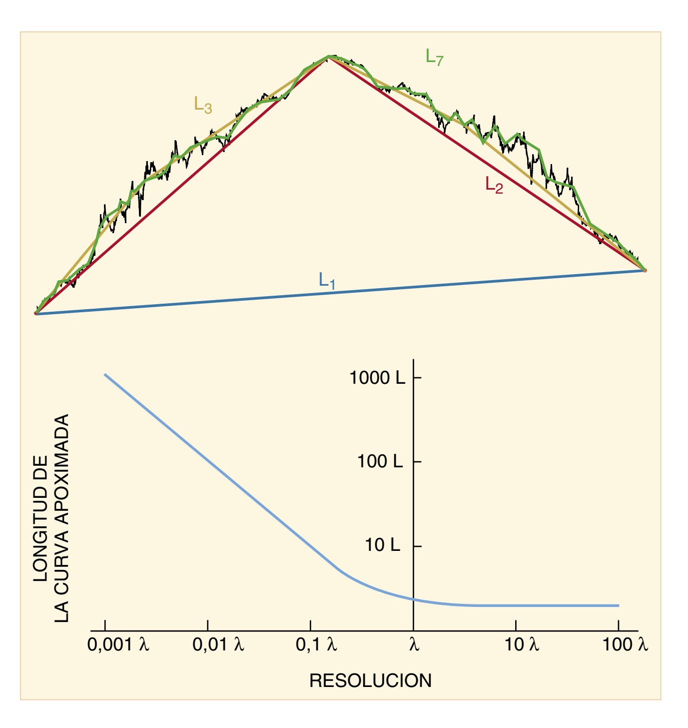
"Para una partícula cuántica, los caminos importantes no son los que tienen una pendiente (o velocidad) bien definida en todas partes, sino los que, por el contrario, son muy irregulares en cualquier escala pequeña. [...] Así, aunque se pueda definir una velocidad media, la velocidad cuadrática media no existe en ningún punto. En otras palabras, las trayectorias no son diferenciables."

El espacio-tiempo no diferenciable

En términos actuales, esta descripción de los caminos cuánticos posibles significa que, aunque sean diferentes y su número infinito, todos son curvas fractales caracterizadas por una propiedad geométrica común: su dimensión fractal es dos. Esta introducción de la no diferenciabilidad en la física es tanto más notable por cuanto, en la misma época, Einstein había considerado explícitamente que un enfoque realista del problema cuántico podría pasar por ahí. En 1948 escribió a Wolfgang Pauli:

"[La] descripción completa no podría limitarse a los conceptos fundamentales que se emplean en la mecánica del punto. Le he dicho más de una vez que soy un partidario acérrimo no de las ecuaciones diferenciales, sino del principio de la relatividad general, cuya fuerza heurística nos es indispensable."

Una vía hacia una comprensión de los fenómenos cuánticos se abre en tal caso. ¿No será preciso proseguir la evolución hacia un espacio-tiempo de generalidad creciente y generalizar el principio de la relatividad a un espacio-tiempo no diferenciable, fractal? La idea de buscar las estructuras generales de un espacio-tiempo no diferenciable que satisfaga el principio de la relatividad, y de deducir de ellas las leyes físicas del movimiento en semejante espacio-tiempo, es seductora: tales leyes, estructuradas por un principio de la relatividad más generalizado, se impondrían como inevitables. La esperanza subyacente bajo semejante punto de vista es comprender que lo cuántico es una manifestación de la no diferenciabilidad.



2. RECONSTRUCCION de una curva no diferenciable mediante aproximaciones sucesivas (*arriba*). Se traza primero el segmento de recta que une los dos extremos (*azul*): existe al menos un punto de la curva fuera de ese segmento; se pueden, pues, trazar dos segmentos que conduzcan a ella. En la etapa siguiente, se dobla el número de segmentos de la misma manera. A cada etapa, la longitud aumenta: $L_1 < L_2 < L_3 < ... < L_n$. Si por debajo de un grosor λ la curva es fractal de dimensión dos y no es fractal por encima, a las escalas grandes la medida L de la longitud no dependerá de la resolución; a las escalas pequeñas, por el contrario, la medida aumentará con la resolución hasta el infinito.

El problema, en todo caso, parece de una dificultad extrema: abandonar la diferenciabilidad, ¿no es acaso abandonar las ecuaciones diferenciales, la herramienta básica de la física tras Leibniz y Newton? Felizmente, es posible otra vía que, de manera asombrosa, se reduce a la precedente al proporcionar un útil matemático que permite describir la no diferenciabilidad ¡con la ayuda de ecuaciones diferenciales!

La solución se encuentra en interpretar en clave fractal los trabajos de Feynman. Consideremos una función continua y no diferenciable casi doquier, trazada entre dos puntos del plano. Cabe aproximarse a ella con sucesivas divisiones en dos segmentos que van construyendo aproximaciones cada vez más precisas (*véase la figura 2*). La longitud de las diferentes aproximaciones depende explícitamente de la resolución; es creciente, divergente incluso, cuando el grosor de la medida tiende a cero. Ello es consecuencia de un teorema establecido por el matemático Henri Lebesgue: una curva de longitud finita es diferenciable casi doquier. A la inversa, si una curva continua es no diferenciable casi doquier, su longitud, necesariamente, será infinita.

El abandono de la hipótesis arbitraria de que una curva del espacio-tiempo es diferenciable, mientras se conserva la de su continuidad, implica una dependencia explícita en función de las resoluciones. No hace falta añadir la hipótesis de que, a escala microscópica, el espacio-tiempo es de naturaleza fractal: eso está demostrado ahora. La relatividad extendida al movimiento no diferenciable es así equivalente a la relatividad de escala. No se trata de una generalización arbitraria y sin constricciones. Se exige que las ecuaciones escritas en tal espacio-tiempo no diferenciable verifiquen el principio de covariancia, expresión matemática del principio de relatividad, es decir, que mantengan la misma forma que en el caso diferenciable.

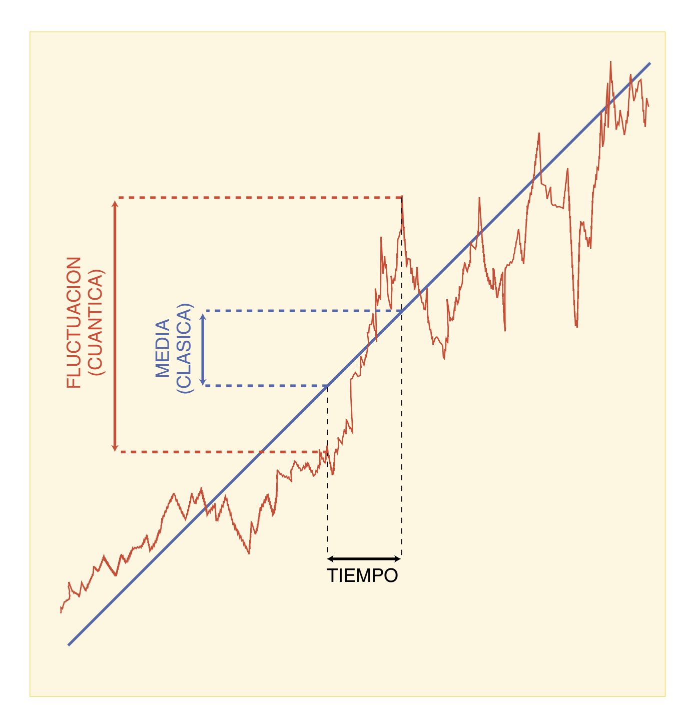
En la relatividad de escala, las leyes que rigen el movimiento se completan con las leyes de escala, que gobiernan las transformaciones entre las resoluciones: las magnitudes físicas dependen también de la resolución. Un primer modo de descubrir la forma de esas leyes de escala consiste en establecer que sean lo más simples que se pueda. Se escribe de esa forma una ecuación diferencial de primer orden respecto a un cambio infinitesimal de la resolución: ¡su solución es la longitud de una curva fractal de dimensión constante! Así, las funciones fractales de dimensión constante, que divergen según una ley de potencia en función de la resolución, son las formas más simples de leyes que dependan explícitamente de la escala. No fue otro el comportamiento que obtuvo Feynman para las trayectorias cuánticas.

La física cuántica deducida de la relatividad

Los principales axiomas de la mecánica cuántica se deducen del concepto de espacio-tiempo fractal. Para empezar, la no diferenciabilidad impone el carácter probabilista de la descripción. En la teoría de Einstein, la trayectoria de una partícula libre es una geodésica del espacio-tiempo. Lo será también en un espacio-tiempo fractal. Sin embargo, la presencia de fluctuaciones en las escalas pequeñas hace infinito el número de geodésicas, que son por definición, todas, equiprobables: la única predicción posible es que la partícula "seguirá" una geodésica de una familia infinita.

Este enunciado es incompleto, pues el enfoque fractal transforma también el concepto de partícula elemental. En la teoría cuántica actual, el electrón, desde el punto de vista de su naturaleza corpuscular, es puntual. Posee propiedades "internas", como el espín (el momento cinético), la masa o la carga. El espín está ligado a una simetría del espacio-tiempo, pero no tiene contrapartida clásica. La carga y las otras magnitudes cuánticas están asociadas a simetrías internas que tampoco tienen contrapartidas en el espacio-tiempo. En el espacio-tiempo fractal se abandona la idea del punto de masa y se consideran las "partículas", con su naturaleza doble de onda y corpúsculo, como el conjunto de las propiedades de las geodésicas.

La descripción del espacio-tiempo fractal implica la toma en cuenta de nuevas estructuras ligadas a las transformaciones de las resoluciones. Estas son vistas como internas, pues las estructuras fractales se desarrollan hacia las pequeñas escalas, esencialmente por debajo de la longitud de De Broglie asociada a la partícula (que es igual al cociente de la constante de Planck y la cantidad de movimiento de la partícula). Esta longitud de onda realiza la transición entre el comportamiento fractal y el no fractal (entre el comportamiento independiente de la resolución, a las escalas grandes, y el que depende de ella explícitamente, a las pequeñas). La esperanza que suscita este comentario es que las propiedades "internas" salgan finalmente de simetrías ligadas a las transformaciones de escala y que tengan un significado geométrico, en el seno de la geometría



3. LA EVOLUCION en el curso del tiempo de una coordenada sobre una trayectoria fractal depende de la resolución que se utilice. A gran escala (*azul*), es decir, con una resolución baja, existe una velocidad media: la variación de la coordenada es del mismo orden de magnitud que la variación del tiempo. Se obtiene el comportamiento clásico. Con una resolución mejor, la fluctuación con respecto a la media domina: la longitud del fenómeno es mucho mayor que la variación del tiempo (*en rojo*). El comportamiento cuántico y las fluctuaciones de las trayectorias aparecen, pues, a partir de una determinada resolución que depende del sistema.

no diferencial. El concepto de partícula dejaría entonces de referirse a un objeto que poseería un espín, una masa o una carga, y se reduciría a las estructuras geométricas de las geodésicas fractales de un espacio-tiempo no diferenciable. Un programa así está lejos de haberse realizado hasta el final, pero hay ya algunos resultados que son estimulantes.

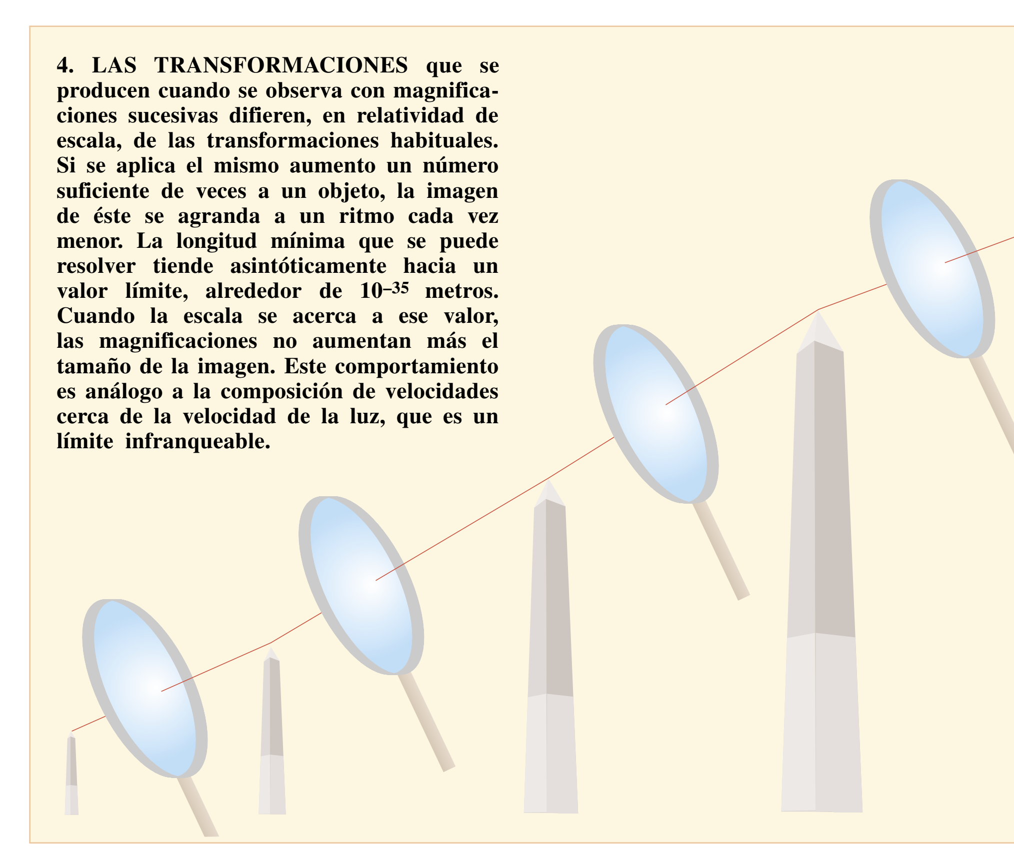
Para empezar, la longitud de la onda y el período de De Broglie asociados a una partícula se interpretan geométricamente mediante una transición entre el comportamiento fractal y el no fractal: son las escalas más allá de las cuales aparecen las vueltas atrás de las trayectorias, espaciales para la longitud, temporales para el período, respectivamente. La energía, la cantidad de movimiento, la velocidad clásica, la velocidad de fase y la masa de la partícula pueden calcularse con facilidad como funciones de esas escalas. Todas estas magnitudes se convierten en características geométricas de las trayectorias fractales.

Lo mismo pasa con el espín: no existe en la teoría clásica, pues es proporcional, en el caso del electrón, por ejemplo, al cuadrado del radio de la partícula, ¡que es nulo! No obstante, es proporcional también a la velocidad de rotación, que puede ser infinita sobre una trayectoria fractal.

El resultado notable es que ese producto de cero por infinito es siempre cero cuando la dimensión fractal de la trayectoria es inferior a dos, es siempre infinito cuando es superior a dos, pero es finito y puede ser no nulo cuando la dimensión es dos. La dimensión dos constituye, precisamente, la de las trayectorias fractales calculadas a partir de las relaciones de incertidumbre de Heisenberg. La carga misma, en fin, se puede interpretar como una magnitud geométrica invariante, que sale de las simetrías de escala.

La indiscernibilidad de las partículas es una consecuencia inmediata de su identificación con las trayectorias fractales. Estas trayectorias no poseen ninguna característica propia que permita distinguirlas. Un conjunto de varias partículas no se identifica con una colección de objetos individuales en el sentido clásico: es un objeto nuevo, una madeja de geodésicas que posee sus propiedades geométricas propias.

LAURENT NOTTALE es físico del Centro Nacional de Investigación Científica en el Observatorio de Meudon.



4. LAS TRANSFORMACIONES que se producen cuando se observa con magnificaciones sucesivas difieren, en relatividad de escala, de las transformaciones habituales. Si se aplica el mismo aumento un número suficiente de veces a un objeto, la imagen de éste se agranda a un ritmo cada vez menor. La longitud mínima que se puede resolver tiende asintóticamente hacia un valor límite, alrededor de 10^{-35} metros. Cuando la escala se acerca a ese valor, las magnificaciones no aumentan más el tamaño de la imagen. Este comportamiento es análogo a la composición de velocidades cerca de la velocidad de la luz, que es un límite infranqueable.

El sentido de la dualidad onda-corpúsculo se separa, en el enfoque no diferenciable, de la interpretación habitual en teoría cuántica. En ésta, la función de onda se identifica con la onda-partícula. En la relatividad de escala, de una parte, una "geodésica particular" (aunque fractal, en cuanto función de la resolución) se identifica con la naturaleza corpuscular de la partícula, como nos la descubren las medidas de la posición, y, de otra parte, la gavilla de geodésicas posibles, única herramienta que permite hacer previsiones, transporta las propiedades ondulatorias.

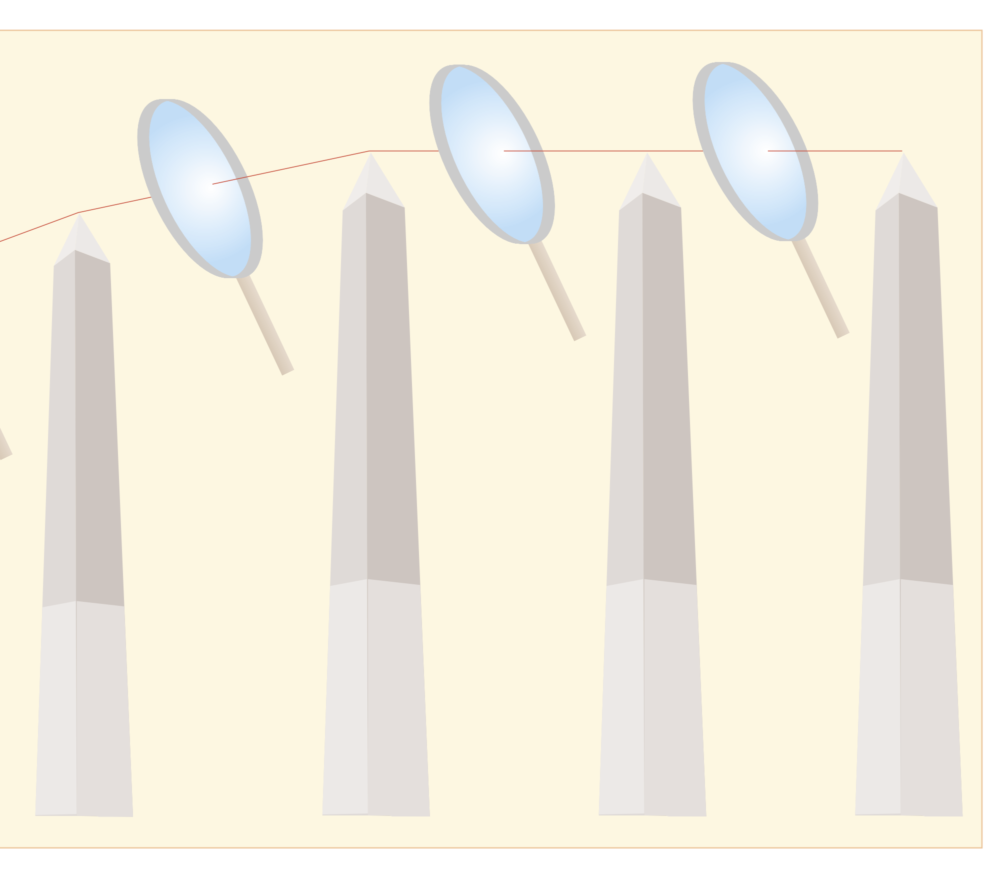
Reintroducir la geodésica particular que habría "seguido" la partícula, ¿no es por ventura volver al determinismo, reintroducir los parámetros ocultos, excluidos por varios experimentos cruciales de la mecánica cuántica? No, pues se abandona totalmente la diferenciabilidad: no existe ninguna escala, por pequeña que sea, por debajo de la cual se reencuentren las propiedades clásicas que transportarían los parámetros ocultos. Es imposible predecir qué geodésica seguirá la partícula.

Verdad y demostrabilidad

A la inversa, ¿qué nos permite establecer la existencia de una tal geodésica particular? El punto de vista de Niels Bohr y de Heisenberg, que se funda sobre la imposibilidad de predicción de una trayectoria particular para deducir su inexistencia, parecía la única respuesta lógica a este problema antes de 1931, fecha de la demostración del teorema de Gödel. No es así, después.

Este teorema dice que, en toda axiomática no contradictoria que contenga la teoría de números, hay enunciados verdaderos, aunque indemostrables. La física es una ciencia altamente matematizada, cuyas teorías, una vez construidas, pueden resumirse en un conjunto de axiomas matemáticos. Que éstos contienen siempre implícitamente la teoría de números se sigue de que la física repose en los resultados de las mediciones. ¿Qué es una predicción en física, sino un "teorema" construido a partir de los axiomas de la teoría considerada? El teorema de Gödel nos enseña que algún día nos encontraremos con enunciados indecidibles también en física. Para mí, ese día ya ha llegado; la mecánica cuántica contiene tales enunciados.

En el experimento de las rendijas de Young, donde se crea una figura



“entrantes” en el mismo punto. Se calcula una velocidad media “hacia atrás” para este proceso inverso. A causa de la no diferenciabilidad del espacio-tiempo, no hay ninguna razón por la que tenga que ser idéntica a la velocidad “hacia delante”. Por lo que se refiere a la descripción de los desplazamientos elementales considerados, los dos sentidos del transcurso del tiempo son igualmente válidos para la descripción de las leyes físicas. Ello conduce a combinar esas dos magnitudes en una velocidad compleja a fin de definir un nuevo proceso doble que sí es reversible. La semisuma de las velocidades hacia delante y hacia atrás constituye la parte real de la velocidad compleja, y la semidiferencia, la parte imaginaria.

Como mayor generalidad, se construye un nuevo operador de derivación compleja a partir de las derivadas medias “hacia delante” y “hacia atrás”, que va a realizar la covariancia de escala. Se puede entonces volver a tomar todas las grandes líneas de la mecánica clásica, y generalizarla con la no diferenciabilidad gracias a esta herramienta, que hace complejas todas las magnitudes antes reales. En particular, la magnitud más importante de la mecánica clásica es la que se denomina “acción”, que tiene la dimensión de un momento cinético, pues el conjunto de las leyes de aquélla se deduce del “principio de la acción estacionaria”: los trayectos físicos son los que anulan la variación de la acción. Se introduce entonces de forma natural en el nuevo marco una acción compleja, sobre la que cabe construir un principio de acción estacionaria generalizado: se trata de la propia función de onda.

El operador de derivación compleja con respecto al tiempo se calcula explícitamente a partir de la descripción de las trayectorias como curvas fractales de dimensión dos. La dimensión dos es un valor particular, para el cual toda dependencia explícita en función de la escala queda “oculta” en el formalismo de los operadores diferenciales de la mecánica cuántica. El principio de correspondencia para el momento y la energía, que, en la mecánica cuántica, les asocia ciertos operadores diferenciales, puede ser demostrado, y la ecuación fundamental de la dinámica se transforma en la ecuación de Schrödinger. Dicho de otra forma, la ecuación de Schrödinger se escribe de manera covariante como la ecuación de las geodésicas para el movimiento inercial

de interferencia al hacer que un haz de partículas atraviese una pantalla donde hay abiertas dos rendijas, la imposibilidad, en presencia de las interferencias, de predecir por qué rendija ha pasado una partícula y la destrucción de las inteferencias por toda medida de la posición han conducido a la conclusión según la cual la investigación de la trayectoria de las partículas carecía de sentido. Según el teorema de Gödel, puede ser verdad que la partícula haya pasado por una de las dos rendijas, cosa que toda medición explícita nos confirma, y que, al mismo tiempo, sea, sin embargo, imposible predecir por cuál: debe distinguirse entre existencia y demostrabilidad.

Las trayectorias posibles de una partícula constituyen un conjunto infinito de curvas fractales (cuyo número crece con cada aumento de la resolución). La descripción de una de esas curvas hace que intervengan las coordenadas medias, macroscópicas, que se identifican con la trayectoria clásica, en el caso de que exista, y las fluctuaciones que dependen de la escala, y que dominan los desplazamientos medios a muy pequeña escala. Una parte de los efectos cuánticos procede de esas fluctuaciones. Así, los comportamientos clásicos y cuánticos son una cuestión de escala.

El carácter relativo de la transición, que depende de la masa y de la velocidad, o, más generalmente, de la temperatura, explica que existan efectos cuánticos macroscópicos, como la superconducción.

Con el desdoblamiento de las variables en clásicas y cuánticas no acaba todo. El carácter complejo de la función de onda que se halla bajo lo esencial de las paradojas de la mecánica cuántica recibe ahora explicación: proviene de una rotura de la invariancia por reflexión temporal, que a su vez es consecuencia directa, como vamos a ver, de la no diferenciabilidad del espacio-tiempo. Es la primera vez en la historia de la física que las ecuaciones no son invariantes bajo el cambio del signo del tiempo. La velocidad, derivada de la posición, es la primera variable a la que afecta ese nuevo comportamiento.

Para una geodésica fractal que llega a un punto dado en determinado instante, hay una infinidad de geodésicas de salida a partir de las que se puede calcular una velocidad media “hacia delante” (*véase la figura 5*). Se trata de un proceso fundamentalmente irreversible: si remontamos el curso del tiempo por la geodésica que ha “escogido” la partícula, encontraremos una infinidad de geodésicas

en el vacío. Cuando se explicita esa ecuación, el comportamiento cuántico aparece como la manifestación del carácter no diferenciable y fractal del espacio-tiempo.

Más allá de la mecánica cuántica

Los conceptos de relatividad de escala y de espacio-tiempo fractal permiten, no obstante, ir más allá de la mera renovación de nuestra comprensión de la mecánica cuántica. Con el método de la covariancia de escala hemos obtenido de nuevo la mecánica cuántica a partir de las leyes de escala más simples que pueden construirse. ¿Son estas leyes "más simples" las que optimiza la naturaleza? ¿No se darían, acaso, las leyes generales que son compatibles con el principio de la relatividad de escala, sólo en el marco restringido de las transformaciones de escala lineales?

Para responder a estas preguntas es preciso olvidar lo que se sabe sobre las leyes de la dilatación y la contracción, y plantearlas sin un *a priori*. La más simple de las leyes de escala posible es una función fractal de dimensión constante: ésta desempeña el papel de invariante de escala. Hemos visto que una ley así permite obtener de nuevo la mecánica cuántica estándar cuando la dimensión fractal es dos. La búsqueda de una formulación covariante más general conduce, sin embargo, a tomar en cuenta una situación donde la dimensión fractal deje de ser invariante y dependa también de la escala.

En este marco ensanchado, el problema es dar con las formas posibles de esa nueva variable de escala que sean compatibles con el principio de la relatividad: si sólo la ley de dimensión constante, que lleva a la mecánica cuántica tradicional, satisface dicho principio, entonces debe ser demostrable. Si se encuentran otras posibilidades, proporcionarán una generalización de la mecánica cuántica. Se trata de saber cómo la longitud curvilínea definida sobre una curva fractal, así como la "dimensión fractal" generalizada que la caracteriza, se transformarán en un cambio de resolución.

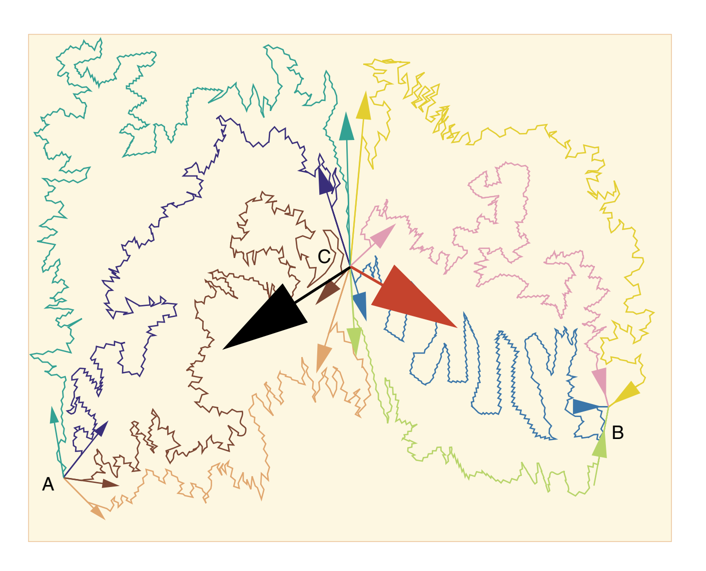
Como en la relatividad del movimiento, la dificultad del problema general conduce a ceñirnos en un primer momento al problema restringido de las transformaciones lineales. La solución particular de este problema que corresponde al comportamiento fractal de dimensión constante es el grupo de transformaciones de Galileo. Cabe mostrar que este problema es, para las escalas, lo que el de la inercia para las leyes del movimiento: su solución general no es el grupo de transformaciones de Galileo, sino el de las transformaciones de Lorentz, con las que Poincaré y Einstein construyeron la relatividad restringida.

La dilatación no dilata más

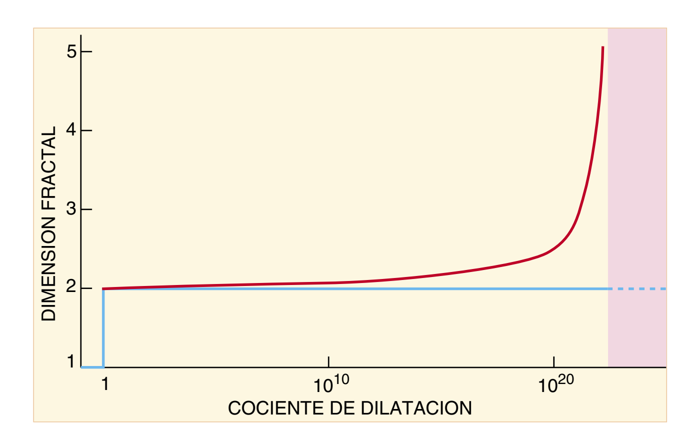
En lo que concierne a las leyes del movimiento, la solución galileana se habría realizado en la naturaleza sólo si la velocidad de la luz hubiese sido infinita. Pasa lo mismo con las escalas: las leyes de dilatación y contracción, consideradas inatacables hoy en día, no son más que aproximaciones a gran escala de leyes más generales. En éstas, la dimensión fractal toma el nuevo sentido de una variable esencial, que representa para las escalas el mismo papel que el tiempo para el movimiento. Esta variable se combina con las coordenadas fractales para formar un vector de un espacio de cinco dimensiones. Es preciso que se entienda bien que la solución general del problema de las transformaciones de escala es la transformación de Lorentz. La cuestión no es ya justificar esta nueva transformación, sino, por el contrario, en caso de que no concordase con la experiencia, comprender por qué se habría "escogido" una solución particular en vez de la solución general.

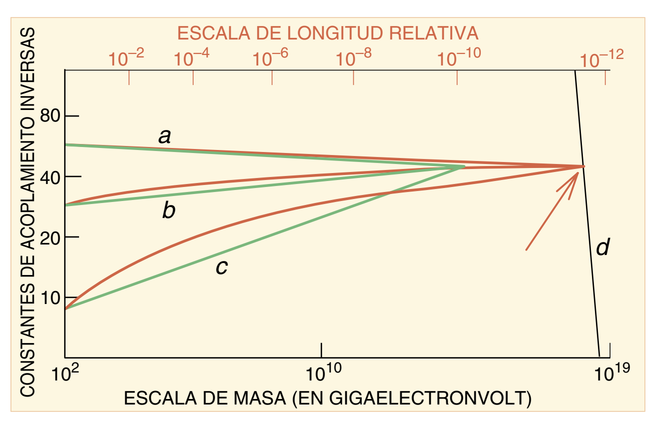
Las nuevas leyes se caracterizan por varias propiedades nuevas con respecto a las leyes de escala habituales, que pueden cotejarse con las propiedades equivalentes ya conocidas en relatividad del movimiento. La principal es la aparición de una escala de longitud insuperable hacia las escalas menores, invariante bajo dilataciones y contracciones. Esta escala desempeña, para las resoluciones, el mismo papel que la velocidad de la luz para las velocidades. Reemplaza al punto cero, que deja de tener sentido físico. No es ni una barrera ni una cuantización del espacio-tiempo: la naturaleza de esta escala límite es la de un horizonte. No pone en entredicho la no diferenciabilidad del espacio-tiempo de la que hemos partido, ni la existencia sin fin de estructuras tras los aumentos sucesivos: es el efecto de tales magnificaciones el que ha cambiado. Lo mismo que se puede ir añadiendo indefinidamente velocidad sin sobrepasar jamás la de la luz, un número arbitrariamente grande de contracciones sucesivas, aplicadas a una escala inicial cualquiera, conduce a una escala relativa siempre superior a la longitud límite.

¿Cuál es el valor de esa longitud límite? ¿Es preciso introducir una nueva longitud fundamental en las leyes de la física, o ésta nos ha proporcionado ya una escala así, a la que sólo hay que interpretar como tal? La longitud de Planck, construida a partir de tres constantes funda-



5. PARA IR DEL PUNTO *A* al punto *B* pasando por el punto *C*, una partícula puede tomar una infinidad de geodésicas fractales, todas equiprobables. A la escala considerada, se define en cada punto de una geodésica una velocidad. La media de esas velocidades sobre las geodésicas que van de *A* a *B* pasando por *C* da la velocidad macroscópica "hacia delante" en *C* (*flecha roja grande*) y la media, obtenida al invertir el signo del tiempo, sobre las que van de *B* a *A* pasando por *C* da la velocidad macroscópica media "hacia atrás" en *C* (*flecha negra grande*). Como el espacio-tiempo no es diferenciable, estas dos velocidades medias en *C* son distintas. Este desdoblamiento fundamental de las velocidades entraña el carácter complejo de la función de onda.





6. LA DIMENSION FRACTAL de la trayectoria de una partícula desempeña el mismo papel con respecto a las transformaciones de escala que el tiempo en las transformaciones del movimiento. Para las transformaciones lineales, vale uno por encima de la escala λ de transición entre los comportamientos fractal y no fractal, y dos por debajo. En el caso no lineal, aumenta continuamente hacia las escalas pequeñas (cuando el cociente de dilatación aumenta). No se puede alcanzar la escala de Planck (*rosa*): la dimensión fractal sería allí infinita.

7. LAS CONSTANTES de acoplamiento inversas de las interacciones electrodébiles (*a* y *b*), fuerte (*c*) y gravitatoria (*d*) son inversamente proporcionales a la intensidad de esas interacciones y varían en función de la escala. En el modelo estándar (*verde*), la unificación se hace en dos tiempos. Si se le añade la relatividad de escala (*rojo*), la escala de longitud relativa (*arriba*) deja de ser inversamente proporcional a la escala de la energía-masa (*abajo*). Las cuatro interacciones convergen entonces simultáneamente hacia la energía de Planck, unos 10^{18} gigaelectrónvolt (*flecha roja*).

mentales de la física, G, la constante de la gravitación, $\hbar$, la constante de Planck, y c, la velocidad de la luz, parece tener todas las propiedades requeridas para identificarla con ella. Tiene un valor de $1{,}6 \times 10^{-35}$ metros. A partir de las mismas constantes se construyen la masa y el tiempo de Planck.

La longitud de Planck representa el límite más allá del cual los efectos de la gravitación se vuelven tan importantes como los cuánticos. El continuo espacio-temporal se rompe en las tentativas de construcción de una teoría de la gravitación cuántica, que describiría los fenómenos físicos a esas energías. Este problema se sigue planteando, por supuesto, en la relatividad de escala, pero de otra forma.

El cambio más inmediato concierne a la relación entre escala de masa, energía y momento, y escala de longitud y tiempo. En la teoría cuántica, estas dos escalas son inversas entre sí. Cada vez que un resultado se expresa mediante una longitud, un radio, un parámetro de impacto característico, lo que se mide explícitamente es una energía y un momento, retraducidos a una escala de longitud, supuestas correctas las relaciones cuánticas usuales. Según las relaciones de incertidumbre, la energía (el momento) tiende hacia el infinito cuando el intervalo de tiempo (la longitud) tiende hacia cero. En las leyes relativistas de escala, ese intervalo no puede ser inferior a la escala de Planck. La escala de longitud y de tiempo de Planck posee ahora las propiedades físicas antes atribuidas a las longitudes y tiempos nulos.

Un cambio tan profundo tiene numerosas consecuencias en física, que deben estudiarse una a una. Uno de los primeros resultados obtenidos con esta teoría no es el menos sorprendente. Las escalas de masa y de longitud dejan de ser directamente inversas: a la escala de la longitud de Planck le corresponde ahora una energía infinita. ¿Cuál es, entonces, la escala de longitud que le corresponde ahora a la escala de la energía de Planck? Se halla que es una escala universal un billón de veces menor que la de los bosones que transportan la interacción electromagnética. Esta escala es, precisamente, la de la gran unificación, descubierta en física de partículas (*véase la figura 7*). Este resultado significa que, desde el punto de vista de la energía, la unificación de las tres interacciones fundamentales (electromagnética, nuclear débil y nuclear fuerte) se efectúa, en el nuevo marco, a la energía de Planck. Como es precisamente la energía a la que la gravitación se vuelve del mismo orden que las otras fuerzas, la unificación de las cuatro interacciones sólo puede ser simultánea.

Si este resultado es más satisfactorio que la unificación en dos tiempos de la teoría actual, no por ello facilita el problema de construir una teoría unificada. Tendría, en todo caso, la ventaja de poner fin a una de las preguntas fundamentales de la física: ¿por qué la constante de gravitación tiene el valor asignado? Podemos plantearla de otro modo remitiéndonos a la expresión cuántica de dicha fuerza, donde se halla que la unidad natural de las masas es la masa de Planck: ¿por qué las partículas más elementales no tienen la masa de Planck? La respuesta es... ¡que la tienen! Se puede considerar, en efecto, que las partículas más fundamentales de la naturaleza son las que transportan la interacción totalmente unificada: una gran parte de esas partículas tendrán la masa de Planck y realizarán así físicamente esta unidad universal de masa.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

RELATIVITÉS I Y II. A. Einstein, Éditions du CNRS/Seuil, 1993.

SCALE-RELATIVITY, FRACTAL SPACE-TIME AND QUANTUM MECHANICS. L. Nottale, en *Quantum Mechanics, Diffusion and Chaotic Fractals*, bajo la dirección de M. El Naschie, O. Rössler e I. Prigogine. Pergamon Press, 1995.

SCALE RELATIVITY; FROM QUANTUM MECHANICS TO CHAOTIC DYNAMICS. L. Nottale, en *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 6, pág. 401, 1995.

Redes de memoria

La ciencia creía haber hallado un lugar para cada memoria en el cerebro. Todo indica, sin embargo, que las distintas clases de memoria están tejidas por redes de neuronas que conectan muchos lugares del cerebro entre sí

Joaquín M. Fuster

Nota característica del sistema nervioso es su capacidad de almacenar información sobre uno mismo y sobre el propio entorno. En el cerebro, todas las regiones almacenan algún tipo de memoria, si bien los humanos solemos ceñir el significado de ese término al conjunto de experiencias personales que un individuo adquiere a lo largo de su vida.

La investigación en primates ha permitido mostrar que la memoria se almacena en gran parte en la neocorteza, es decir, en la región de aparición más reciente en la evolución de la corteza cerebral. Y ha puesto de manifiesto que las distintas clases de memoria están tejidas por redes de neuronas repartidas por la neocorteza e interconectadas entre sí. El sustrato cortical de la memoria, de la cognición en general, es la expansión ascendente de una jerarquía de estructuras neurales que tiene su base en la médula espinal. Cada nivel de esta jerarquía consta de dos componentes principales; a su vez, cada componente está dedicado a una de las dos funciones orgánicas básicas, la de sentir y la de actuar. Lo mismo podemos decir de la corteza cerebral, que tiene una región posterior, sensorial, y una frontal, motora. Ambas almacenan memoria.

La adquisición de memoria consiste básicamente en la modulación de las sinapsis, los contactos entre neuronas. Las memorias están formadas por la facilitación de las uniones sinápticas entre agregados neuronales que representan aspectos singulares del entorno o del interior del propio organismo. Todas las memorias son, pues, esencialmente asociativas; la información que contienen viene definida por relaciones neurales, no por moléculas, ni siquiera por neuronas individuales.

La idea sobre la formación de la memoria que mayor influencia ha ejercido se la debemos a Donald O. Hebb. Propuso que, cuando una neurona excita a otra, y repetida o persistentemente participa en su activación, se producen cambios metabólicos en una o en ambas células, de forma que aumenta la eficacia de la primera para excitar la segunda. El respaldo experimental de este principio se ha obtenido, sobre todo, en invertebrados. En el encéfalo de los mamíferos, se acepta que la potenciación a largo plazo constituye un fenómeno eléctrico duradero de facilitación sináptica, que resulta de la transmisión de impulsos a través de las sinapsis.

Hebb propuso también lo que podríamos llamar el principio de la convergencia sincrónica: "Dos células o sistemas que reiteradamente se muestren activos al mismo tiempo tenderán a convertirse en 'asociados', de suerte tal que la actividad de uno facilita la actividad del otro." Ahora bien, en la corteza, muchas fibras nerviosas, que portan informaciones ("inputs") sensoriales, convergen en las mismas neuronas. Sumando informaciones coincidentes en el tiempo, estas neuronas se asociarán entre sí hasta el punto de que podrán mutuamente substituirse para activar otras células. Las conexiones entre neuronas de entrada de información ("input neurons") y neuronas de salida de información ("output neurons") se verán robustecidas también por fibras recurrentes. A través de tales procesos asociativos, las células se interconectarán en unidades funcionales de memoria, en "asociaciones celulares". La investigación en invertebrados y en la corteza de los mamíferos ha corroborado el papel desempeñado por la convergencia sincrónica y la repetición en la construcción de tales conjuntos o módulos de células y en la codificación de la memoria.

Las memorias o imágenes sensoriales elementales podrían formarse en módulos celulares de áreas sensoriales o parasensoriales de la corteza. Sin embargo, la representación neural de nuestras memorias personales sólo puede formarse en amplias extensiones de la corteza de asociación, un enorme sustrato con un gran poder para combinar conexiones entre módulos y áreas. Fue Friedrich von Hayek, premio Nobel de economía en 1976, con un profundo interés por el cerebro, quien postuló este tipo de sustrato cortical para la memoria. Propuso una extensa red o "mapa" de neuronas corticales que representaría, en su estructura de conexiones, las asociaciones que forman la esencia de cualquier percepción y cualquier memoria.

Las memorias y las percepciones, tal como Hayek suponía y la neurología confirma, comparten redes, neuronas y conexiones. Toda memoria, como toda percepción, es categórica. Percibir es clasificar objetos mediante la activación de las redes asociativas que los representan en la memoria. Cada nueva percepción añade conexiones (asociaciones) a una red preexistente. La conectividad se extiende a través de áreas corticales y trasciende, anatómica y fisiológicamente, módulos definidos. Cualquier célula o grupo de ellas puede ser

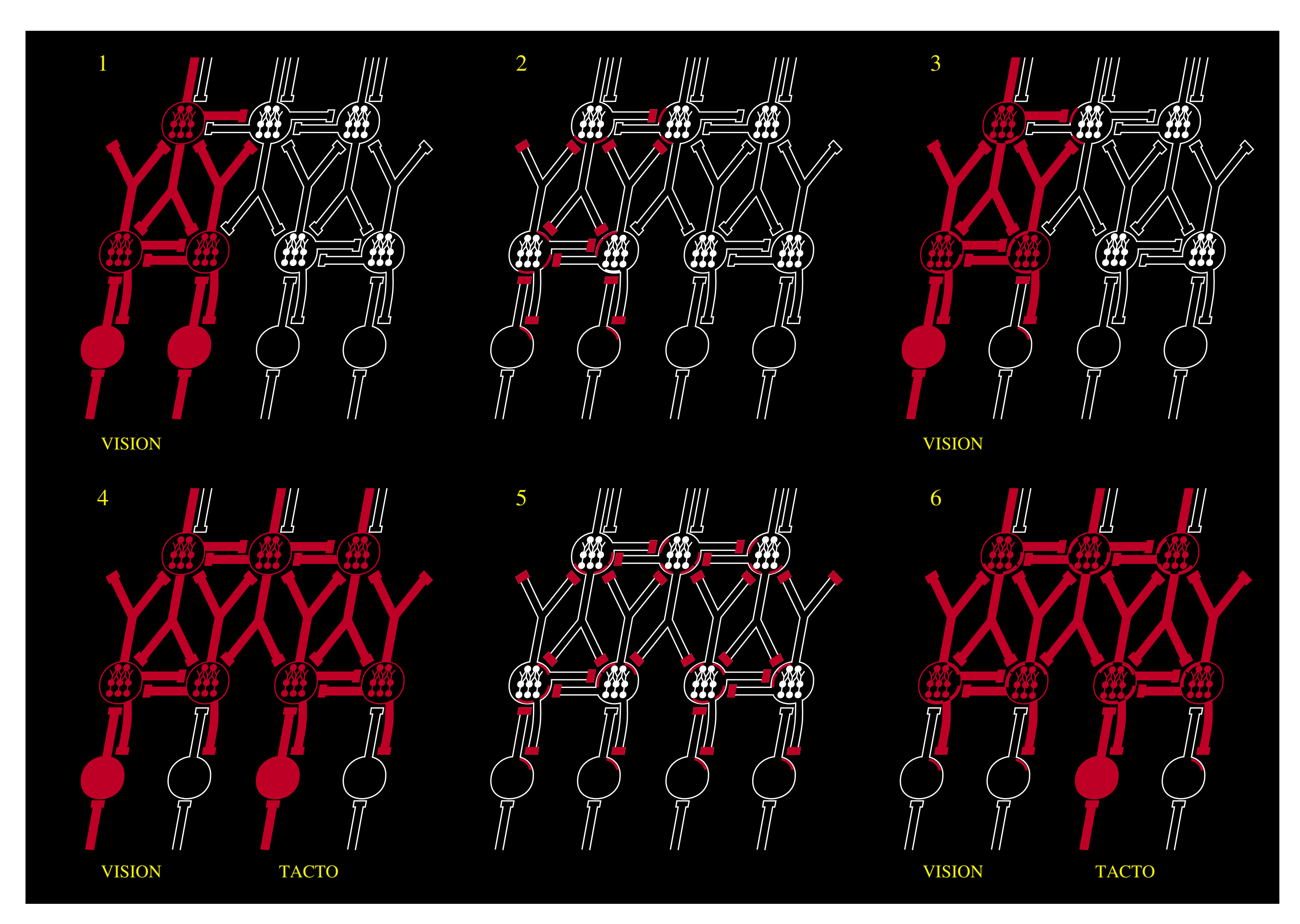
JOAQUIN M. FUSTER, neurofisiólogo de origen español, desarrolla su trabajo en el Instituto de Investigación Cerebral, ente adscrito a la facultad de medicina de la Universidad de California en Los Angeles. Su obra *The Prefrontal Cortex* se ha convertido en libro de obligada referencia, lo mismo que su más reciente *Memory in the Cerebral Cortex*, publicado por MIT Press.

parte de muchas redes, y, por tanto, de muchas memorias.

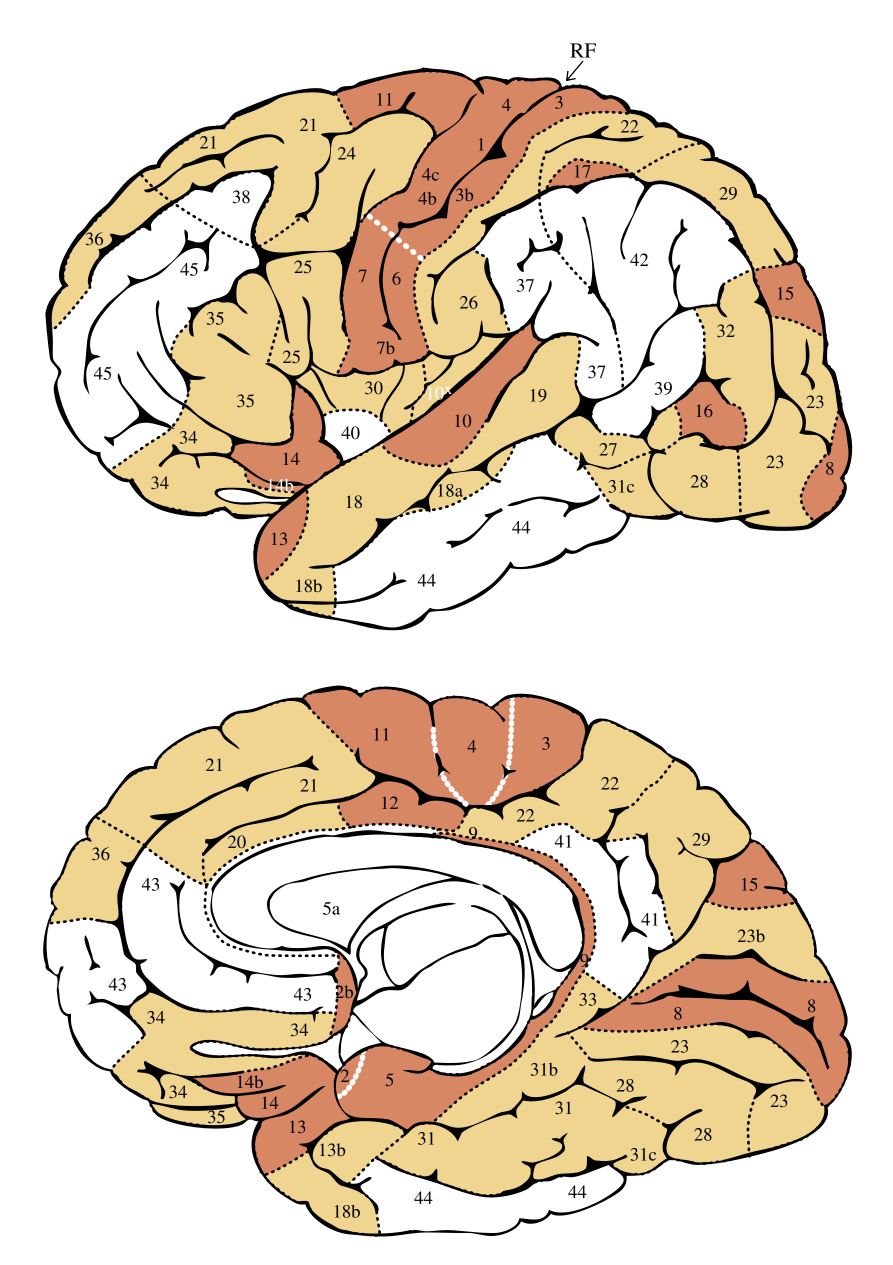
Con la verificación empírica de estas ideas, nuestra opinión sobre la adquisición y la representación de la memoria están experimentando una profunda revolución. Se ha producido un verdadero cambio copernicano: de una neuropsicología que localiza tipos de memoria distintos en diferentes estructuras cerebrales se ha pasado a una consideración de la memoria como una propiedad de todos los sistemas neurales.

En la corteza, las redes de memoria se desarrollan desde los niveles inferiores, es decir, desde las áreas corticales sensoriales o motoras hacia las áreas de asociación. Este crecimiento ascendente se basa no sólo en conexiones laterales, sino también en conexiones de acción proyectiva ("feedforward") y retroalimentación ("feedback") (*figura 1*). En el primer escalón de las jerarquías resultantes residen los módulos neuronales que, por asociación, forman redes elementales de memoria sensorial y motora. Estas constituyen los bloques básicos de las redes multisensoriales y motoras complejas, origen, a su vez, de redes más elaboradas e idiosincrásicas de la corteza asociativa. Y éstas prestan soporte a la memoria declarativa (explícita), no declarativa (implícita) y procedimental.

El hipocampo, una estructura profunda del lóbulo temporal, desempeña un papel crítico en la formación de redes de memoria en la corteza asociativa. Los pacientes con lesiones en el hipocampo sufren de amnesia anterógrada: tienen graves dificultades para adquirir y consolidar nuevas memorias. Para tales procesos resultan decisivas las conexiones recíprocas entre el hipocampo y las áreas neocorticales de asociación. El mecanismo subyacente no está claro. Podría involucrar terminales glutamatérgicas y ciertos tipos de receptores químicos. Estos mecanismos, aun siendo desconocidos, son cruciales para la consolidación de la memoria cortical, para la conversión de la memoria a corto plazo en memoria a largo plazo. La amígdala, otra estructura del lóbulo temporal, imprescindible para la evaluación del



1. FORMACIÓN, almacenamiento y activación de la memoria por asociación sensorial. Hemos supuesto, de forma arbitraria, que la disposición conectiva básica de una red de memoria consta de once neuronas o grupos de neuronas. Aparecen representados todos los patrones de conectividad cortical que se conocen: proyección hacia adelante, retroalimentación, y conexión lateral, en paralelo, convergente y divergente. La propagación de impulsos va de abajo arriba, a partir de receptores sensoriales hacia niveles progresivamente más altos de la red, neuronas activas en rojo. Los tres diagramas superiores muestran los cambios en la red como resultado de la asociación entre dos estímulos visuales: (*1*) la coincidencia temporal de los dos estímulos refuerza la eficacia sináptica en los contactos entre las asambleas de neuronas que los representan; (*2*) la memoria a largo plazo de los dos estímulos asociados queda grabada en las sinapsis facilitadas (*en rojo*); (*3*) uno de los dos estímulos activa la red de memoria asociativa que ahora, debido a la facilitación previa de aquellas sinapsis, incluye la representación del otro estímulo. Los diagramas inferiores muestran los mismos procesos de asociación por coincidencia temporal entre estímulos de dos modalidades sensoriales distintas, visual y táctil: (*4*) los dos estímulos activan simultáneamente la red; (*5*) memoria bimodal a largo plazo; (*6*) el estímulo táctil reactiva la red, con lo cual se evoca la memoria de la imagen visual.



2. MAPA ONTOGENETICO de la corteza cerebral humana, de acuerdo con Paul Flechsig y modificado por Gerhard von Bonin. Se ilustra la superficie lateral (*arriba*) y la superficie medial (*abajo*). Los números indican el orden cronológico de mielinización de las distintas áreas. La fisura de Rolando (*RF*) en la superficie lateral (surco central en el mono) separa la corteza posterior ("perceptiva"; *a la derecha del dibujo*) de la corteza frontal ("motora"; *a la izquierda*). Las áreas sensoriales y motoras primarias están sombreadas en obscuro; las áreas de asociación en blanco o sombra clara.

significado afectivo y emocional de las percepciones, interviene también en la formación y la consolidación de la memoria.

La experiencia actual se incorpora, a través de nuevas conexiones, a la red preestablecida, o redes, que activa. Cada nueva experiencia ocurre sobre un sustrato de memoria antigua asociada con ella y por ella evocada en virtud de su semejanza o concurrencia previa, de suerte, pues, que lo nuevo evoca lo antiguo, y, por asociación y consolidación, se convierte en parte del mismo. La convergencia sincrónica es, en todo caso, el principio clave para que se forme la nueva red mediante la coincidencia temporal de la información nueva con la de la antigua red reactivada.

Para comprender mejor la formación y la topografía de la memoria hemos de ver en las áreas corticales sensoriales y motoras primarias las depositarias de una clase de memoria innata que podríamos denominar "memoria filética" o "memoria de la especie". Ya en el nacimiento, estas áreas contienen en su estructura sináptica la experiencia esencial que la especie ha adquirido en su interacción con el medio. La podemos llamar memoria ya que, al igual que la memoria personal, es información almacenada, que puede recuperarse mediante estímulos sensoriales o la necesidad de actuar. Es eminentemente adaptativa, ya que contiene la prolongada experiencia adaptativa de la especie.

Para servir a un organismo, la memoria filética requiere la "repetición" al inicio de la vida. En efecto, resulta apropiado considerar como períodos de repetición las etapas críticas postnatales en las cuales las áreas sensoriales primarias necesitan experimentar estímulos sensoriales para el desarrollo temprano de su función. El período crítico para el desarrollo del canto del pájaro podría ser un fenómeno análogo a la memoria filética motora; el sistema motor de los mamíferos experimenta períodos similares. Además, hay pruebas de que las estructuras sensoriales y motoras primarias conservan su plasticidad en la fase adulta. La memoria filética puede, pues, modificarse y ampliarse en el organismo adulto.

Sobre el basamento de la memoria filética crece la memoria individual. Esta última puede considerarse expansión de la memoria filética en la corteza de asociación. Las cortezas primarias proporcionan a esa corteza los elementos de la experiencia que, por asociación sincrónica, crean o facilitan sinapsis en las redes de la memoria individual.

La transición anatómica de la memoria filética a la individual, de la corteza primaria a la de asociación, sigue gradientes de desarrollo y gradientes conectivos. En la medida en que la ontogenia recapitula la filogenia, la transición también sigue un gradiente filogenético. Al igual que en la evolución, la neocorteza de asociación experimenta un desarrollo tardío y mayor que la corteza sensorial o motora primaria. Al menos un índice de maduración estructural, la formación de mielina, muestra que éste sería el caso. La neocorteza de asociación, que es el sustrato de la memoria más personal, no alcanza la maduración plena hasta la juventud y probablemente conserva la plasticidad sináptica durante toda la vida.

En la corteza cerebral humana pueden reconocerse dos gradientes de desarrollo; uno en su parte pos-

terior, que comprende los lóbulos temporal, parietal y occipital, y otro en la corteza del lóbulo frontal. El primero marca el desarrollo de las áreas implicadas en la percepción; el segundo, el de las áreas involucradas en el movimiento y la acción. Las últimas en desarrollarse son las áreas de asociación de las regiones temporal y parietal, y la corteza prefrontal en el lóbulo frontal.

La fisura de Rolando, el surco central, separa dos grandes sectores corticales, uno dedicado a la percepción y el otro a la acción. En cada sector el desarrollo progresa desde la corteza primaria hacia la de asociación. La progresión posterior culmina en la corteza asociativa que acomoda las redes de memoria episódica y semántica; la anterior culmina en la corteza prefrontal, cuyas redes representan los esquemas de la acción y median su realización.

Estos gradientes de desarrollo se corresponden bastante bien con los gradientes de conexión entre áreas. En la corteza posterior, las fibras parten de las áreas sensoriales primarias hacia las áreas de la corteza asociativa. En la corteza frontal, predomina el flujo en sentido inverso, de la corteza asociativa (prefrontal) a la primaria (motora). Sin embargo, en ambas cortezas, anterior y posterior, todas las uniones conectivas son recíprocas: la retroalimentación acompaña a la acción proyectiva. Además, las direcciones de conexión reflejan gradientes de procesamiento de información en la elaboración y la evocación de memoria.

Las áreas sensoriales primarias de la memoria filética envían información a las áreas asociativas posteriores, donde las asociaciones que coinciden en el tiempo forman redes de memoria perceptiva. A través de mecanismos similares, la retroalimentación motora y la llamada "copia eferente" de la acción tejen redes de memoria motora en la corteza frontal. Al reconstruir los esquemas motores que representan, estas redes conducen los actos elementales, innatos, manifestados a su vez en la corteza motora primaria y en las estructuras motoras subcorticales. Así consideradas, las memorias perceptiva y motora derivan de la memoria filética. Ambas son asociativas, se distribuyen por la corteza y están jerárquicamente organizadas.

La memoria perceptiva es la memoria adquirida a través de los sentidos. Abarca cuanto solemos entender por memoria personal y conocimiento: representación de eventos, objetos, personas, animales, hechos, nombres y conceptos. La diversidad de formas de memoria perceptiva puede agruparse en distintas categorías de rangos diferentes según su contenido sensorial y su generalidad. Hay una jerarquía de memorias perceptivas que va de lo sensorialmente concreto a lo conceptualmente general. En la base encontramos las memorias de las sensaciones elementales; en la cima, los conceptos abstractos que, aunque adquiridos por la experiencia sensorial, se han independizado de ella.

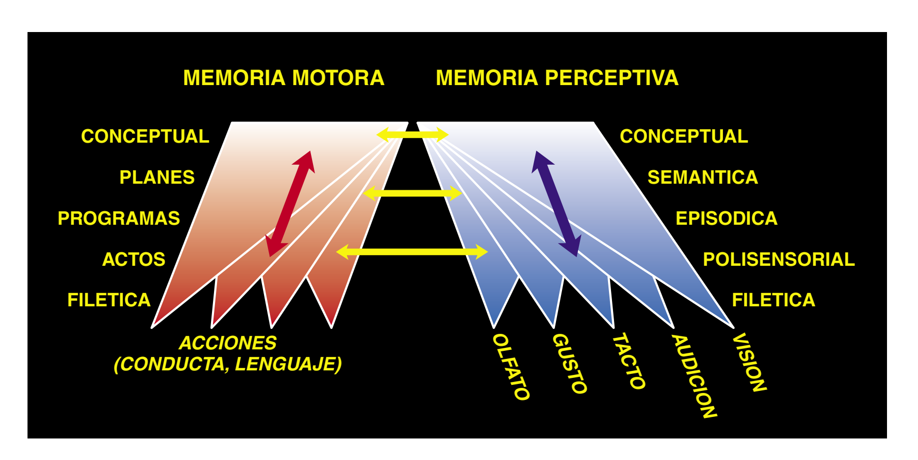
La jerarquía de las memorias perceptivas se basa a su vez en una jerarquía paralela de áreas de la corteza posterior, dispuesta en el orden de desarrollo y conexiones indicado. En los niveles inferiores, la jerarquía de memoria perceptiva se corresponde con la jerarquía neural para el procesamiento y análisis de la información sensorial. De hecho hay también una jerarquía de áreas para cada una de las modalidades sensoriales: vista, tacto, oído, gusto y olfato. Todas ellas convergen en la corteza de asociación polisensorial y, además, en estructuras límbicas del lóbulo temporal, en particular el hipocampo.

Las áreas de asociación parasensoriales, aquellas que se encuentran próximas a la corteza sensorial, almacenan en sus redes memoria sensorial. Su lesión provoca agnosias o déficits en el reconocimiento de la modalidad sensorial correspondiente. La memoria perceptiva activa podría involucrar la activación de células de las áreas sensoriales primarias, quizás a través de proyecciones retroactivas desde la corteza de asociación, pues se ha comprobado que la imagen visual mental activa a la corteza visual primaria.

El hecho de que las mismas áreas corticales sirvan tanto para almacenar la memoria perceptiva como para el procesamiento de información sensorial proporciona fundamento neural para la estrecha relación que existe entre la percepción y la memoria. Recordamos lo que percibimos y percibimos lo que recordamos. En el acto perceptivo, proyectamos sobre el mundo nuestras expectaciones e "hipótesis" basadas en la experiencia pasada.

Ascendiendo en la jerarquía cortical de la memoria (y la percepción), cuando entramos en las áreas de desarrollo más tardío, nos introducimos en el sustrato de las redes más complejas y extensas de la memoria polisensorial y declarativa, tanto episódica como semántica. Aquí la topografía de las memorias resulta oscura debido a la amplia distribución de sus redes, que unen los dominios dispersos de la corteza de asociación, cada uno de los cuales representa distintas cualidades asociadas por la experiencia. Como estas memorias son más difusas que las memorias sensoriales simples, poseen también mayor solidez.

Hay pruebas de que las memorias declarativas se distribuyen en la corteza posterior de asociación. En humanos, la estimulación eléctrica de puntos de la superficie de la corteza



3. ESQUEMA DE LA ORGANIZACION JERARQUICA de los distintos tipos de memoria dentro del sector perceptivo (*derecha*) y motor o "ejecutivo" (*izquierda*). Las flechas indican la conectividad bidireccional entre las regiones corticales que sustentan memorias de categoría diversa. Ambas jerarquías, perceptiva y motora, se asientan sobre una base de memoria filética constituida por las áreas sensoriales y motoras primarias; en la cima se encuentran las redes representativas de los conceptos generales.



4. MAPA CITOARQUITECTONICO DE LA CORTEZA CEREBRAL, según Korbinian Brodmann. Aquí los números marcan áreas de arquitectura celular distinta. Sobre esta imagen de la corteza, siguiendo el código de color de la figura anterior, hemos proyectado la distribución aproximada de las distintas categorías de memoria.

posterior induce experiencias sensoriales y mnemónicas muy diversas, algunas con todas las características de la memoria episódica. Otras pruebas proceden de los numerosos trabajos sobre amnesia retrógrada tras lesiones de la corteza posterior de asociación. Singulares por las lesiones discretas que las causan son las amnesias episódicas de los infartos de la arteria cerebral posterior izquierda. En cualquier caso, sin embargo, la idiosincrásica naturaleza y probablemente la amplia distribución de las redes de memoria episódica hacen que sea difícil definir con precisión su topografía cortical.

Por su individualidad y amplia distribución resulta también difícil acotar la siguiente forma compleja de memoria declarativa, la memoria semántica. Se trata de la memoria para las palabras, los hechos y las categorías. La neuropsicología humana, sin embargo, proporciona muchas pruebas de anomias, afasias semánticas y amnesias categóricas tras las lesiones de la corteza posterior de asociación, incluyendo el área de Wernicke, el tercio posterior de la circunvolución temporal superior. La memoria semántica se apoya, pues, en redes extensas de la corteza cerebral posterior.

No hay pruebas ni siquiera para sugerir la topografía del conocimiento intelectual, que es el nivel más alto de la jerarquía de la memoria perceptiva. Parece probable que este tipo de memoria posee la distribución cortical más extensa, basada como está en experiencias particulares múltiples y profusas asociaciones entre modalidades. Semejante distribución de sus redes es lo que podría sin duda proporcionarle su excepcional robustez.

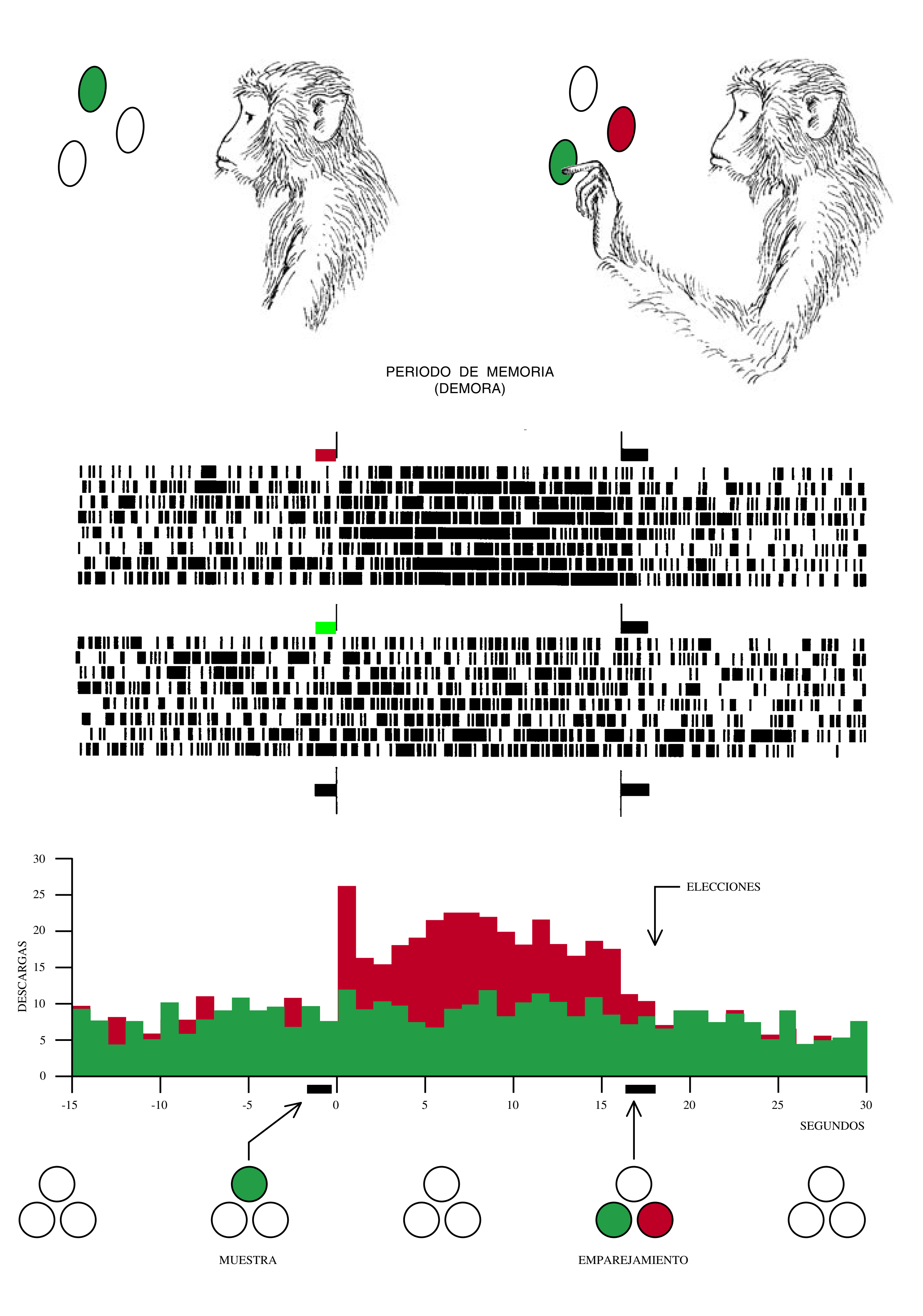
Nos hemos ocupado hasta ahora de la estructuración jerárquica de las categorías de memoria perceptiva. Sin embargo, las redes y las memorias de rango diferente están profusamente interconectadas unas con otras. Esto explica la rareza de las amnesias puras de cualquier categoría de memoria; además, la mayoría de las memorias están entremezcladas. Mostrémoslo con un ejemplo sencillo de la vida diaria. Mi memoria de la visión y los sonidos del tranvía de San Francisco (memoria sensorial) está asociada a la memoria de mi última visita a esa ciudad (memoria episódica), con el significado de la palabra tranvía (memoria semántica) y con el concepto de transporte público (memoria conceptual). Estas memorias y sus redes están anidadas la una en la otra, de la inferior a la superior e interconectadas entre sí y con otras, vertical y horizontalmente en la jerarquía.

La memoria motora o ejecutiva es la representación de los actos y las conductas motoras. Tan inseparable es la memoria perceptiva del aparato neural para el procesamiento sensorial, como la memoria motora lo es del aparato neural para el movimiento. La jerarquía de las estructuras neurales dedicadas a la ejecución de acciones motoras es la base de una jerarquía de memorias motoras que cursa en paralelo en diversos aspectos (complejidad, generalidad, idiosincrasia) con la jerarquía de las memorias perceptivas.

En los mamíferos, los niveles inferiores de la jerarquía motora residen en la médula espinal, el troncoencéfalo y el cerebelo. Estas estructuras almacenan las formas de memoria motora elementales, por ejemplo, los actos reflejos que median las reacciones de defensa congénitas. Algunos de estos reflejos son condicionables y están bajo la influencia de los centros superiores. Una muestra de ambas cosas es el reflejo palpebral, que puede ser condicionado emparejando un soplo de aire en la córnea con un sonido. La asociación crítica se establece en el cerebelo.

Por encima del cerebelo y del troncoencéfalo, en la jerarquía de las estructuras motoras, se hallan los núcleos del tálamo, los ganglios basales y el hipotálamo. Una vez más, como en los centros inferiores, la mayor parte de la memoria motora de estas estructuras es filética, por cuanto se trata de una memoria innata, estereotipada y relacionada con motivaciones básicas, verbigracia, las conductas instintivas. También es condicionable, sujeta a control neocortical y modulación.

5. ACTIVIDAD DE UNA NEURONA de la corteza ínferotemporal de un mono en una tarea de memoria visual que consistía en emparejar colores, lo que se llama emparejamiento retardado con la muestra. Se le presentó al animal una muestra de color, que debía retener durante una demora posterior ("período de memoria") para poder emparejar y elegir apropiadamente el color al final del ensayo. Así varias veces, aunque cambiando aleatoriamente, de un ensayo a otro, el color de la muestra y su posición en el momento del emparejamiento. Los registros de la actividad de la célula en los ensayos aparecen en el centro de la figura; debajo, los histogramas correspondientes a las frecuencias medias. Obsérvese la elevada descarga de la célula durante el período de memoria (16 segundos entre la muestra y el emparejamiento) en los ensayos con la muestra roja; obsérvese también que, después de la segunda aparición del rojo (para el emparejamiento), y en la ausencia de necesidad de memorizar el color, la actividad de la célula desciende al nivel de la línea de base anterior a los ensayos.


PERIODO DE MEMORIA
(DEMORA)
30
25
20
15
10
5
0
DESCARGAS
ELECCIONES
-15
-10
-5
0
5
10
15
20
25
30
SEGUNDOS
MUESTRA
EMPAREJAMIENTO

La corteza del lóbulo frontal es la base de los niveles superiores de la jerarquía de las memorias motoras. En el nivel cortical inferior está la corteza motora primaria, sede de la memoria motora filética, que representa y media los actos motores elementales. Estos actos están definidos por la contracción muscular. Por encima de la corteza motora primaria, siguiendo los gradientes de desarrollo y conectividad de la jerarquía motora, está la corteza premotora. En coordenadas espaciales y temporales, la representación y el procesamiento del movimiento en esta corteza son más complejos que en la corteza motora. Se ha comprobado que las redes premotoras codifican actos motores definidos por su objetivo, secuencia y trayectoria.

La corteza prefrontal, que es la corteza de asociación del lóbulo frontal, constituye el nivel superior de la jerarquía motora. Se desarrolla tarde, filogenética y ontogenéticamente, y recibe conexiones de fibras de estructuras subcorticales y límbicas, así como de otras áreas de la neocorteza. Portan hasta la corteza prefrontal información relativa a los estados internos y al medio exterior. Largas fibras aferentes unen las redes de memoria perceptiva de la corteza posterior con redes motoras prefrontales, formando así asociaciones perceptivo-motoras en el nivel superior.

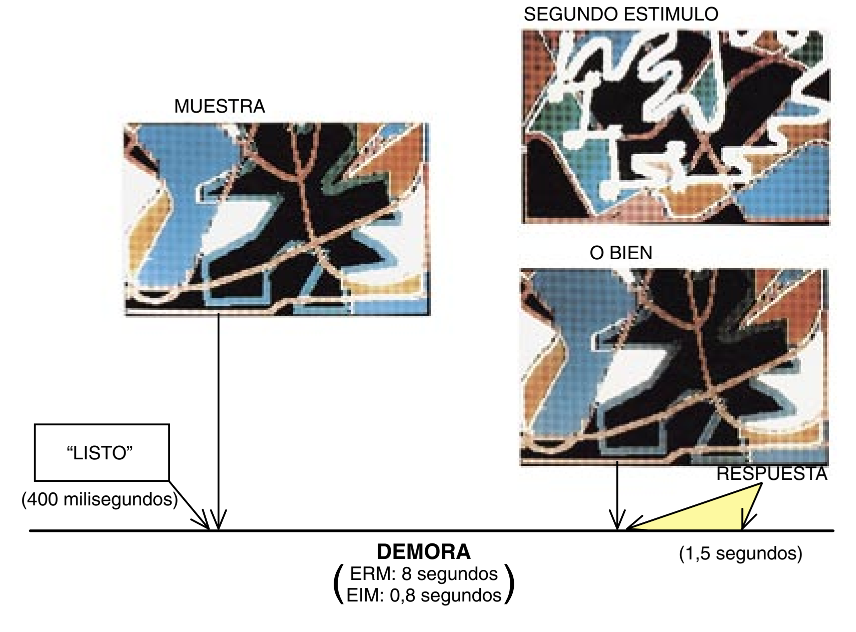
Se sabe que las áreas corticales prefrontales representan en sus redes los esquema*s* de acciones secuenciales dirigidas a un objetivo. Los monos sometidos a lesiones prefrontales tienen dificultades para aprender tareas cuya ejecución exige una secuencia de actos, sobre todo si entre acto y acto median hiatos temporales. Son lentos en aprender las "tareas con demora" (respuestas retardadas, alternancia retardada, emparejamiento retardado). Lesiones tanto en monos como en los humanos indican un grado de especificidad en el tipo de esquemas de acción que residen en las diferentes regiones prefrontales.

Tras la práctica intensa, las representaciones frontales de las acciones parecen reacomodarse en estructuras motoras inferiores, sobre todo en los ganglios basales. Los humanos con lesiones frontales pierden su capacidad para realizar voluntariamente secuencias de movimientos complejos, pero la retienen para ejecutar las automáticas. En el mono, las lesiones corticales pueden interrumpir el aprendizaje de nuevas habilidades, pero no la ejecución de las antiguas. Las imágenes de la acción cerebral extraídas por tomografía de emisión de positrones (PET) confirman esta observación. Cuando un sujeto empieza a aprender una habilidad manual, las áreas frontales se activan. Al principio, sólo se activa la corteza prefrontal; conforme el sujeto va dominando la tarea, cerebelo y ganglios basales se tornan cada vez más activos y las regiones corticales menos.

En resumen, una jerarquía de áreas frontales aloja una jerarquía de memorias motoras. Las memorias y habilidades motoras (memoria procedimental) están codificadas y almacenadas en redes prefrontales y premotoras, al menos en sus estadios iniciales de aprendizaje. Cuando se ha aprendido una secuencia motora hasta hacerla automática, su representación parece relegarse a estructuras inferiores. Pero ciertas tareas continúan dependiendo de la corteza frontal. Este es el caso de tareas que contienen contingencias temporales variables entre estímulos y respuestas motoras, tales como las tareas demoradas. La ejecución correcta requiere entonces un acto de integración temporal que descansa en la función integradora temporal de la corteza prefrontal.

En cualquier momento de la vida diaria la mayor parte de nuestra memoria a largo plazo se halla en estado de latencia, fuera de la consciencia. Probablemente, los agregados neuronales de sus redes se encuentran inactivos u ocupados en actividades "espontáneas" aleatorias. Una red de memoria se reaviva cuando la memoria a la que representa se recupera por el recuerdo o el reconocimiento. Un estímulo o un grupo de estímulos, cuya representación cortical se ha convertido en parte de la red mediante asociación previa, reactivará esta representación y, también por asociación, al resto de la red. Ni los estímulos activadores ni la memoria activada necesitan ser plenamente conscientes. Algunos fragmentos de la red pueden activarse subconscientemente.

En la reactivación de una red neural por el recuerdo o el reconocimiento, el hipocampo parece desempeñar un papel importante. Se ha observado que los pacientes con lesiones de esta estructura no sólo tienen dificultades para formar nuevas memorias, sino también para recuperar las antiguas. A partir de este momento exhiben



6. TAREA DE MEMORIA VISUAL PARA UN SUJETO HUMANO con objeto de estudiar la actividad metabólica cerebral durante activación de memoria operativa. En esta tarea de emparejamiento retardado con muestra (ERM), los estímulos son imágenes abstractas proyectadas sobre una pantalla. Al principio de cada ensayo aparece brevemente un estímulo muestra. Sigue una demora de 8 segundos, al fin de la cual aparece un segundo estímulo que puede ser o no ser idéntico a la muestra. Si lo es, el sujeto tiene que apretar un botón; si no lo es, otro. Separadamente, el sujeto tiene que ejecutar la misma tarea con presentación inmediata de los dos estímulos, sin demora entre los dos (EIM).

amnesia retrógrada, amnesia anterógrada o las dos. Puesto que las redes de memorias nuevas son expansiones de las antiguas, los procesos neurales de formación y recuperación de la memoria están estrechamente relacionados, si no son idénticos. Así pues, el hipocampo participa en ambos.

El mono rhesus es un modelo animal excelente para investigar los mecanismos de la memoria cortical de los humanos. Por varias razones: similaridad de la morfología macroscópica y microscópica de la corteza en humanos y monos; una citoarquitectura de 6 capas del neocórtex prácticamente idéntica; conectividad topológicamente idéntica del neocórtex con el tálamo y con otras estructuras subcorticales; parecidos gradientes de desarrollo de la conectividad en la corteza anterior y posterior, y sistemas neurotransmisores prácticamente idénticos.

Para estudiar la dinámica de las redes de memoria, los investigadores registran con microelectrodos las descargas de las células corticales en monos despiertos. Así podemos ver la activación de las células de una red durante el reconocimiento y la retención temporal de la memoria que esa red representa. Este es el caso de la ejecución en tareas demoradas, donde los recuerdos deben retenerse para salvar los intervalos temporales de la conducta. La tarea de demora se desarrolla a través de una serie de ensayos, cada uno de los cuales consta de varias etapas: presentación de la señal sensorial, período de demora durante el cual el sujeto ha de retener la señal en cuestión, respuesta motora, que está relacionada con dicha señal y proporciona pruebas de la retención mnésica, y un premio para la respuesta correcta.

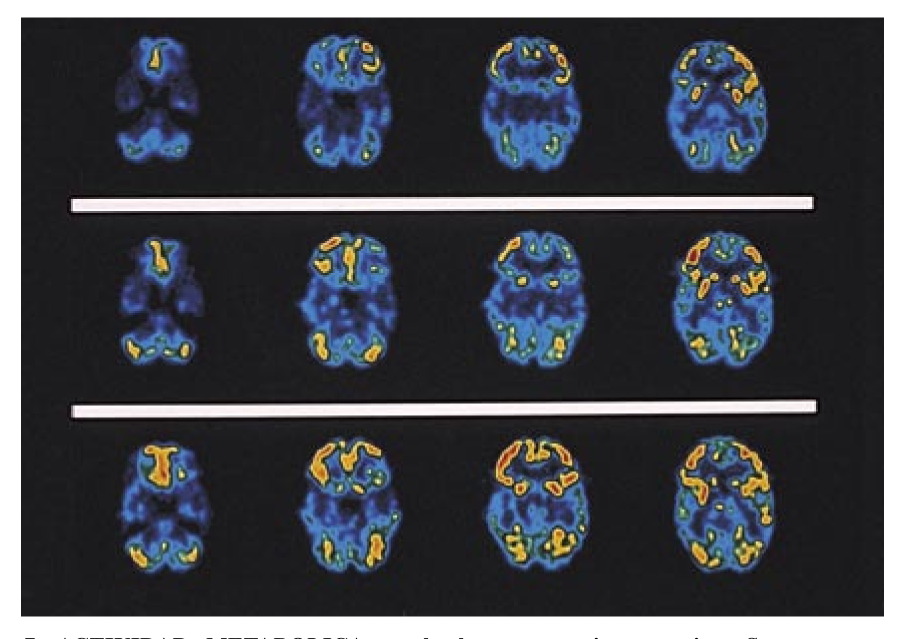
En el animal adiestrado, la señal del principio de cada ensayo activa una extensa red compuesta de todas las representaciones neurales de la percepción y la acción con ese memorándum asociadas. Se activan las memorias perceptiva y motora (procedimental). Así, previsiblemente, la señal excita a las células de las áreas corticales posteriores involucradas en su procesamiento y, además, a las áreas frontales que participan en el procesamiento de la respuesta motora asociada con ella. Por ejemplo, si la señal es visual, las células se activarán en la corteza ínferotemporal y en ciertas áreas de la corteza prefrontal. Como el mono debe retener la señal a lo largo de un período de demora para producir la respuesta correcta subsecuente, la red que representa la señal habrá de permanecer activada durante ese período. De esta forma, las "células de memoria" ínferotemporales mostrarán activación continua durante ese período.

Además, por ser la señal un indicativo para la acción prospectiva, activa una red prefrontal que representa esa acción (memoria motora a largo plazo) y prepara el aparato motor para ella. De ahí, la activación sostenida de las células prefrontales durante la demora de todas las tareas de memoria, con independencia de la modalidad sensorial de la señal aunque con cierta especificidad de área según esa modalidad y la naturaleza de la respuesta motora.

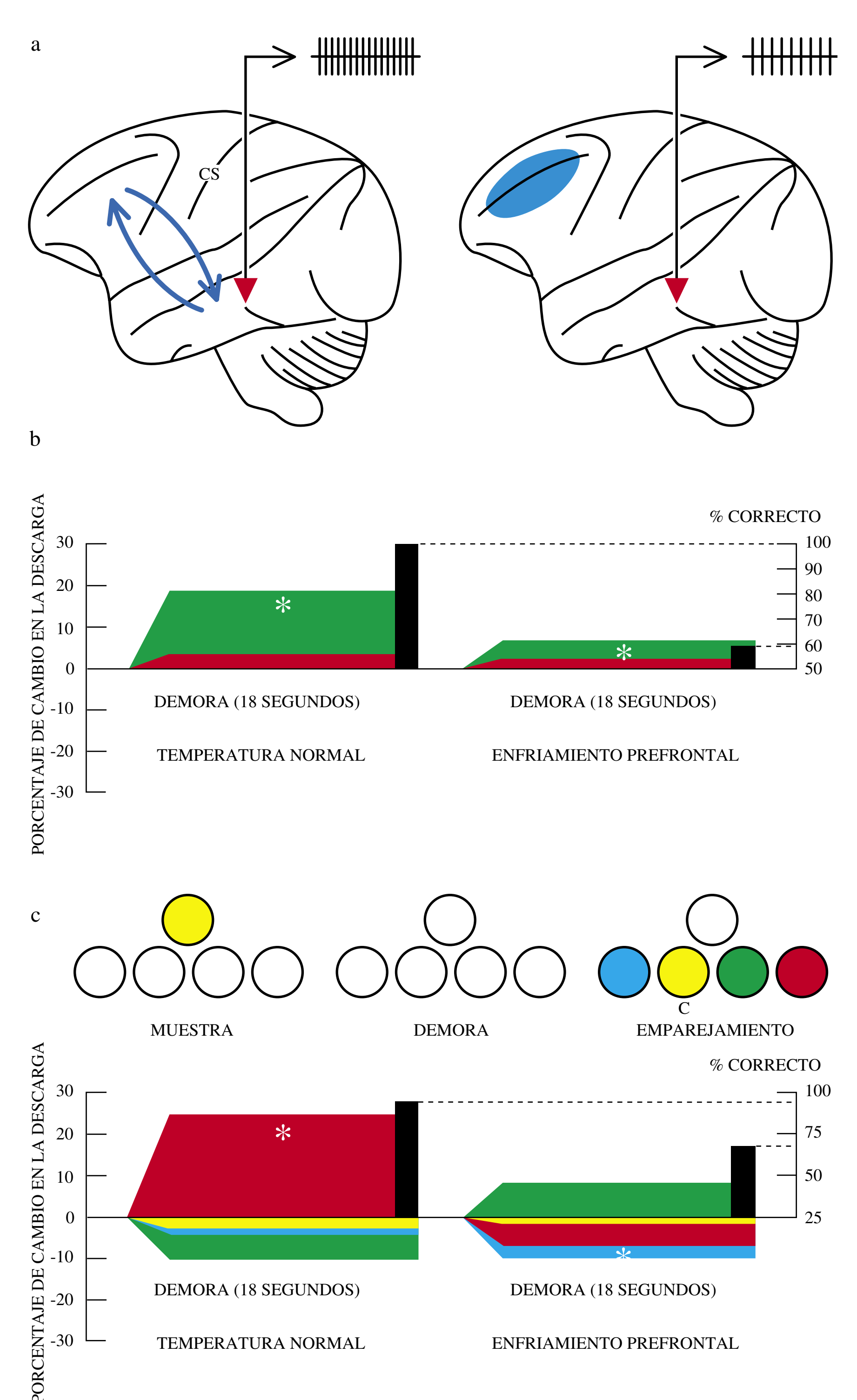
Debido a la amplia distribución y a la composición mixta de las memorias perceptivas, las imágenes obtenidas de la actividad neural en funcionamiento (tomografía de emisión de positrones o resonancia magnética) mientras se lleva a cabo una tarea de memoria muestran activaciones variables y pobremente definidas de la corteza posterior; sólo parecen activadas fidedignamente aquellas áreas que procesan las características sensoriales del memorándum. En el lóbulo frontal, sin embargo, las áreas prefrontales se activan siempre que el memorándum se retiene para la acción prospectiva. La activación metabólica de las áreas prefrontales durante la retención de señales visuales o verbales para respuestas manuales o verbales está hoy bien documentada. Las activaciones prefrontales reflejan la activación de la memoria motora y —por unión funcional con la corteza posterior— la activación persistente de la memoria perceptiva.

Por ello, la memoria operativa ("working memory") no es más que la activación temporal, *ad hoc*, de una extensa red de memoria perceptiva y motora a largo plazo. El componente perceptivo de dicha red podría ser recuperable y expandible por un nuevo estímulo o experiencia. La memoria operativa tiene el mismo sustrato cortical que el tipo de memoria a corto plazo tradicionalmente considerada como la puerta de la memoria a largo plazo. Ambas encajan en la categoría de memoria activa, que sólo difiere de la memoria a largo plazo pasiva en el estado de la red, no en su distribución cortical.

De lo anterior se infiere que la dinámica cortical para evocar memoria episódica es la misma que para evocar un estímulo familiar, tal como la señal en la tarea demorada. Esta señal está representada en la corteza posterior. Pero sabemos que la corteza



7. ACTIVIDAD METABOLICA cerebral en memoria operativa. Se muestran cuatro secciones tomográficas (PET) de la acumulación de glucosa radioactiva en el cerebro de un sujeto en reposo (*franja superior*) y como resultado de realizar las dos tareas en la figura precedente: emparejamiento retardado con muestra (ERM) (*abajo*) y emparejamiento inmediato con muestra (EIM) (*centro*). (En cada sección el frente es hacia arriba; el nivel de actividad, del más bajo al más alto, está codificado de azul a rojo en escala de color.) Obsérvese la mayor activación de la corteza prefrontal (*en lo alto de cada sección*) durante la tarea de memoria (ERM).



8. EFECTOS DEL ENFRIAMIENTO de la corteza prefrontal sobre las células de memoria de la corteza ínferotemporal durante la ejecución de tareas de memoria visual. Arriba (*a*) se muestran diagramas del cerebro del mono, en los que se esquematizan las conexiones (*flechas*) entre las dos cortezas, prefrontal e ínferotemporal; estas conexiones cruzan el surco central (CS) por debajo. Además se esquematiza la zona prefrontal a enfriar (*en azul*) y un microelectrodo de registro celular (*punta roja*) en la corteza ínferotemporal. En medio (*b*), las gráficas de descarga media de una célula ínferotemporal durante el período de demora de la tarea de emparejamiento con dos colores (*figura 5*); durante temperatura cerebral normal (*izquierda*), y durante enfriamiento prefrontal a 20 grados C (*derecha*). (Los colores de la gráfica corresponden a los colores del memorándum.) La célula se activa persistente y preferentemente durante la retención del verde. El enfriamiento prefrontal atenúa la diferenciación del color por parte de la célula durante la demora y causa una disminución de las respuestas correctas del animal, del 100 al 59 por ciento (*barras negras*). Abajo (*c*), las gráficas de otra célula ínferotemporal en una tarea con cuatro colores (esquematizada encima de las gráficas; *c* señala la respuesta correcta en el ensayo del esquema; los colores de las gráficas corresponden a los del memorándum). Esta célula se activa especialmente durante la retención del rojo. El enfriamiento prefrontal deprime esta activación mientras la ejecución correcta del animal decae. (Los asteriscos en las gráficas indican niveles de descarga que se desvían significativamente de la línea de base antes de los ensayos.)

prefrontal es esencial para toda la memoria operativa de cualquier señal conducente a la acción prospectiva. Por eso es por lo que esta corteza reviste tanto interés para la secuenciación de la conducta, el pensamiento y el habla, funciones todas que requieren memoria operativa.

La memoria operativa aparece vinculada con la memoria a largo plazo en el mono que realiza una tarea con demora. La señal para recordar es una memoria antigua reactivada. Podría no evocar los episodios que condujeron a la adquisición de su significado, pero sí evoca su significado al igual que evoca la memoria procedimental de la tarea. En otras palabras, es porque el mono "ha estado antes allí" por lo que puede realizar la tarea. Las viejas memorias se activan para su uso a corto plazo en cada una de sus etapas.

Cuando la secuenciación motora o la integración temporal requiere la retención durante cierto tiempo de una memoria perceptiva antigua, tal como ocurre en cualquier tarea demorada, en tal retención intervienen la corteza posterior y la prefrontal. Un probable mecanismo subyacente es la reanudación de la actividad a través de circuitos recurrentes. La reentrada del impulso explicaría las descargas neurales sostenidas que se han observado en ambas cortezas durante los períodos de retardo de las tareas demoradas.

En el mono que está realizando una tarea de memoria visual, la reentrada del impulso se produce a través de conexiones recíprocas largas que unen la corteza ínferotemporal con la corteza prefrontal dorsolateral. Por tanto, la retención

de una señal depende de la integridad funcional de los componentes ínferotemporales y prefrontales de la red. Es más, la correcta ejecución de tareas de memoria visual puede impedirse reversiblemente mediante el enfriamiento temporal de la corteza prefrontal inferior o de la corteza ínferotemporal, en el animal activo. Además, mediante el enfriamiento de una de estas dos cortezas, prefrontal o ínferotemporal, y mediante el registro celular en la otra, pueden obtenerse pruebas directas de la mutua actividad reentrante en la memoria operativa visual. Estos resultados destacan el papel de las influencias tónicas de la corteza prefrontal en relación con la activación sostenida de la memoria visual en la corteza ínferotemporal.

Resumiendo, la evocación de antiguas memorias perceptivas, al igual que la formación de otras nuevas, supone la activación asociativa de vastas redes neurales de la corteza posterior que las representan en su estructura conectiva. Si una memoria evocada está asociada con una acción, entonces la red activada se extiende hacia el lóbulo frontal. La necesidad de retener la memoria para la acción prospectiva conduce al reclutamiento de redes prefrontales. Estas envían impulsos tónicos a la corteza posterior y mantienen activa la red perceptiva hasta la terminación de la acción motora o mental.

En definitiva, las pruebas disponibles indican que, en humanos y en primates no humanos, la memoria se almacena en redes de neuronas corticales que se superponen y se hallan interconectadas a lo largo y ancho de su amplia distribución. Puesto que la conectividad cortical puede formar un número casi infinito de asociaciones potenciales, las redes potenciales son asimismo casi infinitas.

Las redes de memoria se forman y se expanden mediante la activación simultánea de conjuntos neurales que representan informaciones y acontecimientos externos e internos, incluidas las informaciones en las redes reactivadas de la memoria a largo plazo. Estas redes permanecen abiertas durante toda la vida, sujetas a expansión y recombinación por las nuevas experiencias. Al mismo tiempo, sus uniones conectivas y elementos neurales son vulnerables al envejecimiento, como lo son también las memorias que hacen posibles.

Las redes de memoria perceptivas y motoras se organizan jerárquicamente a partir de las cortezas sensorial y motora primarias, fundamentos de la memoria filética. La organización jerárquica, sin embargo, no supone que las diversas memorias individuales estén rígidamente empaquetadas y almacenadas en dominios corticales definidos. Antes bien, los diferentes tipos de memoria (episódica, semántica, procedimental y conceptual) están vinculados entre sí en redes mixtas que abarcan distintos niveles de las jerarquías perceptiva y motora.

No hay una razón clara para asignar las memorias a corto y a largo plazo a diferentes sustratos corticales. Probablemente, la misma red sirve para almacenar una memoria a largo plazo y para retener una memoria a corto plazo. La retención de la memoria a corto plazo se basa en la excitación sostenida de su red, debida en gran parte a la activación recíproca entre sus componente corticales.

La conectividad entre distintos niveles y distribuida determina que la memoria esté ampliamente representada y que sea recuperable a través de múltiples líneas de acceso asociativo. Consecuentemente, la memoria episódica o semántica que está anclada en asociaciones extensivas es robusta y resistente a las lesiones corticales circunscritas. Sin embargo, algunas de sus asociaciones específicas —al lugar, tiempo, nombre o cara— son muy susceptibles de perderse por debilitamiento de la corteza incluso en el envejecimiento normal. La repetición y el ejercicio mental probablemente contrarrestan este desgaste reforzando antiguas asociaciones y creando otras nuevas.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ORGANIZATION OF BEHAVIOR. Donald O. Hebb. University of Chicago Press, 1949.

THE SENSORY ORDER. Friedrich von Hayek. University of Chicago Press, 1952.

MEMORY IN THE CEREBRAL CORTEX: AN EMPIRICAL APPROACH TO NEURAL NETWORKS IN THE HUMAN AND NONHUMAN PRIMATE. Joaquín M. Fuster. MIT Press, 1995.

MNEMONIC CELL ACTIVITY IN SOMATOSENSORY CORTEX. Yong-Di Zhou y Joaquín M. Fuster en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, USA, vol. 93, págs. 10533-10537, septiembre de 1996.

THE PREFRONTAL CORTEX (3.ª edición). Joaquín M. Fuster. Lippincott-Raven Press, 1997.

Shawn Carlson

Caza y cría de mariposas

Mis primeras aventuras en el territorio de la ciencia se remontan a mi niñez, cazando mariposas entre las flores del jardín de mi madre. Ella estaba enamorada de su jardín ante los estallidos de flores amarillas, azules y violetas, pero a mí me interesaba mucho más acechar a los ostentosos visitantes que atraían aquellas flores.

Los lepidópteros constituyen quizás el orden de insectos más estudiado. Pese a ello, con un equipo modesto, el entomólogo aficionado puede hallar en las mariposas una fuente de diversión casi inagotable, e incluso hacer algunas investigaciones originales. Sus poblaciones reaccionan espectacularmente a las variaciones del medio y cada espécimen tiene su propio método.

Lo primero que necesita un cazador de mariposas es, por descontado, una red. Podemos comprarla en cualquier tienda de suministros de ciencias naturales. Pero, ¿por qué no construirnos una?

Nunca debemos intentar cazar un insecto en vuelo. Lo más que obtendremos será suciedad, rasguños y cansancio, tras media hora de persecución infructuosa. Se aconseja acercarse sigilosamente a la posible presa mientras se esté alimentando, para atraparla desde atrás. También cae alguna si permanecemos quietos mientras revolotean a nuestro alrededor. La red debe emplearse para sorprenderlas en su camino, pero no frente a ellas. Atrapada la presa, ciérrese la vía de escape con un giro rápido de 90 grados.

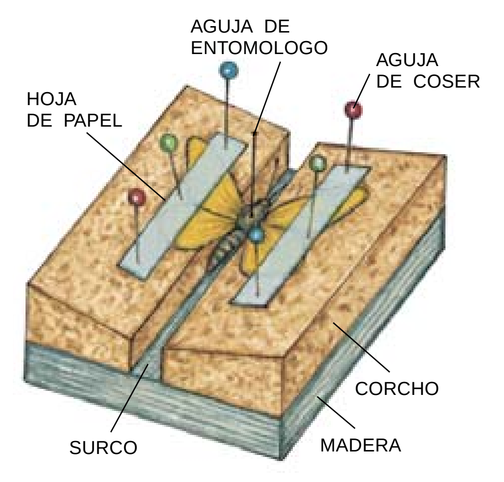
Para reunir una colección de mariposas, conviene criar nuestros propios ejemplares; se hallarán exentos de los parásitos que atentan contra los insectos silvestres. El estudio resultará fascinante. Por suerte, las mariposas son de cría fácil. En muchas especies, el sexo de sus miembros puede determinarse mediante los patrones de manchas de las alas. Pero si dudamos, haremos bien en conseguir, al menos, cuatro miembros de la especie que deseemos criar. Tendremos, entonces una probabilidad de siete sobre ocho de disponer al menos de una pareja que aparear. Se introducen en un terrario de vidrio lleno de plantas del tipo de las que se alimentan las mariposas. Es correcto emplear trozos cortados, que deberán cambiarse a menudo para que se mantengan frescos. Con una malla de algodón o un trozo de muselina, taparemos la boca del terrario, que estará al aire libre, aunque alejado de la luz solar directa.

Las hembras pueden atraer a los machos para el apareamiento. Pero evitemos la sugerencia cruel de ciertos entomólogos, que aconsejan fijarlas a un árbol con una chincheta para inmovilizarlas. Su aleteo agónico la dañará gravemente y es probable que atraiga más depredadores que galanes. Es mejor atarlas corto anudando un hilo de 10 cm entre su tórax y abdomen y fijando el extremo con una chincheta en el centro de una tabla de anuncios gruesa de unos 20 cm de lado. Sujétese a este cuadrado un ramillete de las flores favoritas de la mariposa; colguemos el conjunto horizontalmente al atardecer y cerca del lugar de su captura. Esta plataforma la mantendrá alejada de la mayoría de los depredadores que habitan en los árboles y su balanceo asustará a los pájaros.

A primera hora de la mañana, trasladaremos la madre gestante a un recinto revestido de red que rodee a una planta de la que puedan alimentarse las orugas de su especie. Las orugas pueden ser muy exigentes respecto a su comida, por lo que algunas mariposas depositan sus huevos sólo en determinados tipos de plantas. Los huevos podrían ser estériles, pero, si eclosionan, fijémenos en las orugas que se portan mejor.

Como habitáculos para las orugas los mejores son los envases de plástico de agua mineral de dos litros. Tras rebanarle la parte superior, lo taparemos con un trozo de muselina sujeta con cinta adhesiva; introduciremos luego en el interior los huevos con la planta alimenticia preferida por las orugas (o trozos de la planta donde la hembra puso los huevos. Un poquito de vaselina por dentro del labio interior impedirá que las crías trepen por el costado y se enmarañen en la red.

Mantendremos las orugas al aire libre con una luz solar y una temperatura lo más cercana posible a la de su entorno normal. Conforme madure la nueva familia, habrá que ir buscando más habitáculos. Para convertirse en crisálida una oruga debe colocarse en la posición adecuada;



Fijación de una mariposa. Las aquí representadas son: hembra de Danaus plexippus *(arriba derecha); macho* (centro)*;* Papilio machaon *(abajo) y* Lycaeides melissa samuelis *(arriba izquierda)*

no habrá sitio en el recipiente para una progenie de cinco. Prepararemos con ramitas nichos adecuados en las botellas. Si se diera el caso de que tuviéramos un número excesivo de orugas, dejemos sueltas las sobrantes en su entorno natural, sobre plantas alimenticias vivas. Traspasaremos después las crisálidas o los capullos que se hayan desarrollado a su terrario al aire libre. En la libreta de campo iremos anotando las incidencias de su evolución diaria. Si no ocurre ninguna catástrofe, al final todos darán unos adultos.

Para la fijación o montaje hay que escoger los mejores ejemplares. Tradicionalmente se eligen dos; uno que se coloca boca abajo y otro que se monta boca arriba, con el fin de dejar a la vista las dos caras de las alas. Dentro de un colador de té pondremos bolas de algodón impregnadas de un insecticida comercial o pulidor de uñas. Con un hilo suspenderemos el colador cerca de la boca de un tarro estanco y apilaremos algunas toallitas de papel sobre el fondo del tarro. Aturdido el insecto con un pellizco firme (aunque cuidadoso) por debajo del tórax, los introduciremos en el tarro y cerraremos la tapa. Media hora más tarde, volveremos para sacar el espécimen del tarro.

Si hubiéramos de postergar el montaje, guardaremos el ejemplar en un trozo de papel secante doblado triangularmente. Las mariposas sin fijar se almacenarán en un recipiente sellado dentro del congelador, hasta que podamos montarlas. Cuando llegue su momento, nos aseguraremos de que los especímenes han retornado a la temperatura ambiente.

En la figura de la página precedente se muestra el procedimiento para montar mariposas. Para los alfileres son buenas superficies las de corcho o de madera de balsa. Estas deben formar cierto ángulo para compensar la tendencia a inclinarse de las alas. Se empieza por insertar un alfiler de entomólogo por el costado dorsal derecho del tórax. (No hay que emplear nunca alfileres de costura: son demasiados gruesos y se oxidan.) Desplegaremos y aseguraremos bien las alas. Sujetaremos luego el insecto al centro de la tabla de montaje. Para impedir que el abdomen se combe, cruzaremos dos alfileres exactamente por debajo del mismo. Dejaremos que el espécimen se seque durante una semana por lo menos antes de trasladarlo a una caja permanente.

La presencia de minúsculos montoncitos de polvo debajo de los ejemplares denuncia la actividad de insectos diminutos que podrían estar devorando lentamente nuestra colección. Conviene, pues, cerciorarse de que todas las cajas están herméticamente cerradas con algunas bolas de naftalina que mantengan a raya a esos merodeadores.

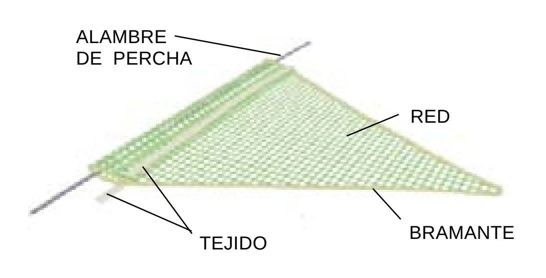
Todo coleccionista que se precie debe estar en contacto con el museo de historia natural más cercano. Numerosos museos coleccionan las especies locales para controlar las variaciones en esas poblaciones. Coleccionar para una institución es una magnífica manera de hacer que la ciencia avance y proporciona a los científicos los datos en bruto que necesitan para contribuir a la protección del medio natural.

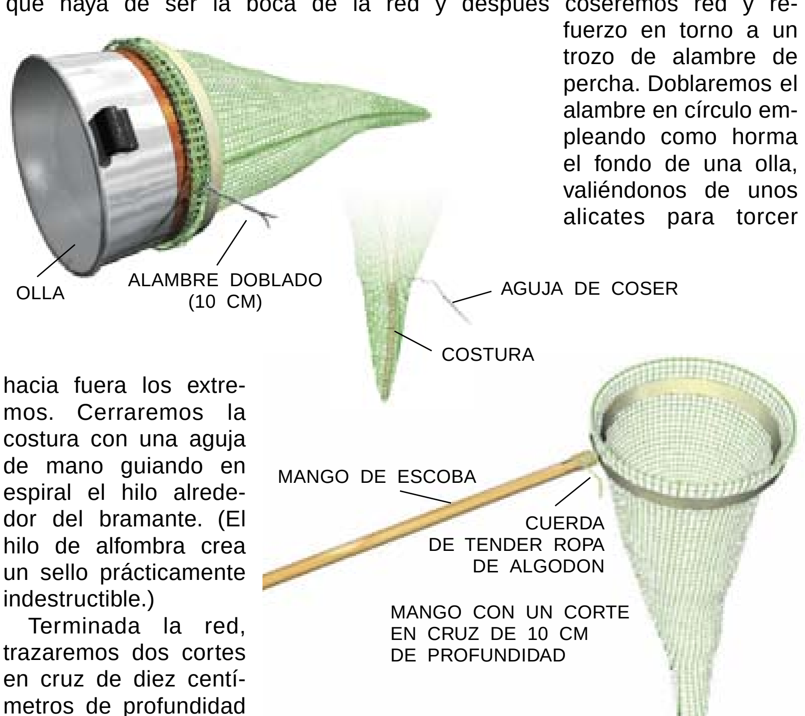
Para más información acerca de este y otros proyectos de ciencia amateur, consulte la página World Wide Web de la Society for Amateur Scientists en http://www.thesphere.com/SAS/. Puede Ud. llamar al 800-873.87.67 o al 619-239.88.07, o bien escribir a Society for Amateur Scientists, 4735 Clairemont Square, Suite 179, San Diego, CA 92117.

Construcción de una red cazamariposas

El recogedor debe hacerse de redecilla de algodón tupida y flexible. Tendrá una hondura mínima de 60 cm. Con una máquina de coser sujetaremos un trozo de bramante a lo largo del borde que luego será la costura lateral; este refuerzo evitará que la costura se deshaga. Fijaremos un refuerzo de tela a lo largo del borde que haya de ser la boca de la red y después coseremos red y refuerzo en torno a un trozo de alambre de percha. Doblaremos el alambre en círculo empleando como horma el fondo de una olla, valiéndonos de unos alicates para torcer hacia fuera los extremos. Cerraremos la costura con una aguja de mano guiando en espiral el hilo alrededor del bramante. (El hilo de alfombra crea un sello prácticamente indestructible.)

Terminada la red, trazaremos dos cortes en cruz de diez centímetros de profundidad con una sierra de calar a lo largo del eje de un palo de escoba (*dirección t*). Insertaremos los extremos del bastidor de la red y agregaremos una generosa dosis de epoxia de 24 horas a las ranuras. Por último, enrielaremos fuertemente el conjunto dentro de una capa de cuerda de tender.





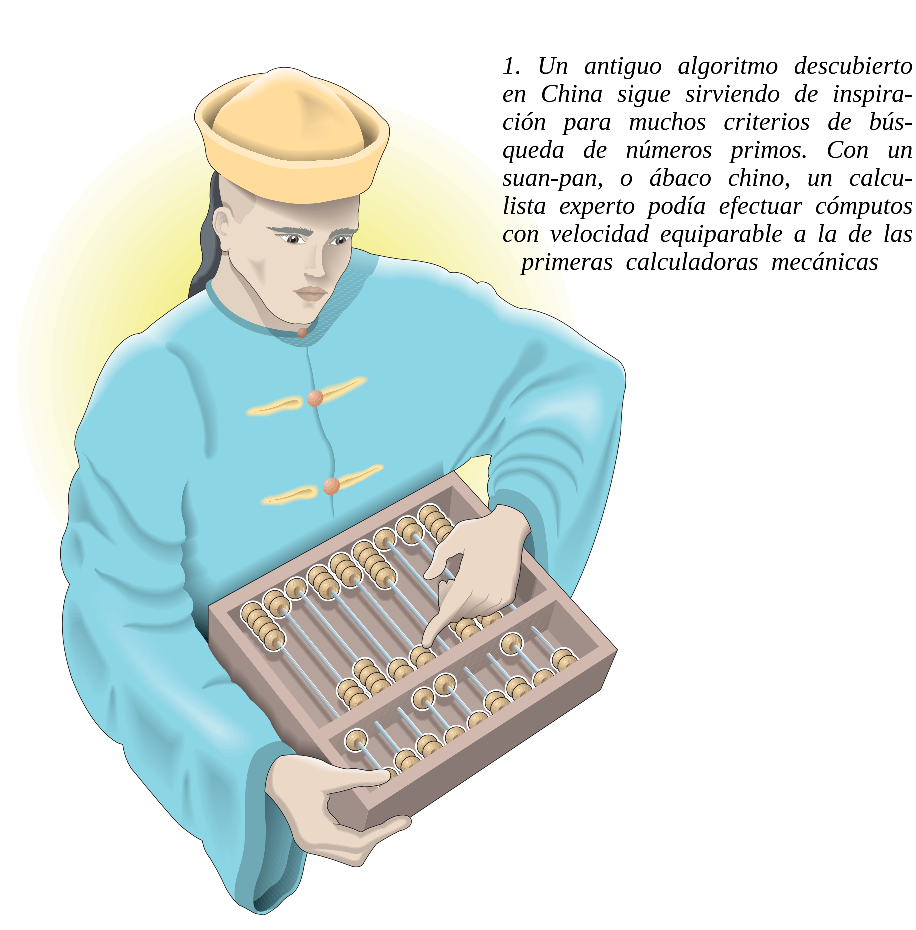
Ian Stewart

Caza mayor en territorio primo

Siempre viene bien echarle una mirada a los números grandes, que han adquirido ahora en criptografía una prominencia insospechada. Números primos y descomposición en factores constituyen en ella asuntos de máximo interés. Por ejemplo, el sistema de codificación RSA, que recibe el nombre de sus inventores Ronald L. Rivest, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, Adi Shamir, del Instituto Weizmann de Ciencias, en Israel, y Leonard M. Adleman, de la Universidad de California del Sur, se basa en números obtenidos como producto de dos números primos grandes, números, por dar una idea, de unas 100 cifras cada uno. No entraré en la descripción del sistema criptográfico, sino en los dos problemas matemáticos subyacentes, que son:

- Criterio de primalidad: Dado un número grande, ¿cómo determinar si es o no un número primo?
- Descomposición en factores: Dado un número grande, ¿cómo hallar sus divisores?

Recordemos que los factores o divisores de un número son aquellos que lo dividen exactamente, y que los números primos son números divisibles solamente por sí mismos y por la unidad. Como es obvio, resuelto el problema de la factorización quedaría determinado el carácter primo o compuesto de cada número, pero el problema de la descomposición factorial parece revestir una dificultad considerablemente mayor. En la actualidad resulta factible determinar si un número arbitrario de 200 cifras es primo o compuesto; no ocurre así, en cambio, con su descomposición en factores (salvo para números de tipos especiales). La exploración de los territorios primos resulta ser mucho más sencilla que la de las tierras factorizables, cuyo mundo es el de todos los números enteros. De cualquier modo, los apasionados por la caza mayor en teoría de números se han adentrado profundamente en uno y en otro territorios. La sección de este mes estará dedicada a los criterios de primalidad; la del mes que viene, a la descomposición en factores.



1. Un antiguo algoritmo descubierto en China sigue sirviendo de inspiración para muchos criterios de búsqueda de números primos. Con un suan-pan, o ábaco chino, un calculista experto podía efectuar cómputos con velocidad equiparable a la de las primeras calculadoras mecánicas

Nos enseñaron en la escuela un método infalible —un algoritmo— para hallar divisores: el tanteo sistemático. Dado un número, como el 1997, vamos probando a dividirlo por todos los números menores que su raíz cuadrada (que en este caso es 44 y pico). En teoría basta ensayar sólo con divisores primos, pero ello exige, en general, una lista de números primos, por lo que una solución intermedia suele consistir en probar con el 2 y todos los números impares menores que la raíz cuadrada. En nuestro caso habríamos de tantear con 2, 3, 5, ..., 43, lo que supone un total de 22 hipotéticos divisores. Ninguno de ellos divide exactamente a 1997 y, en consecuencia, 1997 es primo. El mismo método, aplicado a 1921, sí produce un divisor: 17. Hallamos que $1921 : 17 = 13$; al repetir el procedimiento con 113, descubrimos que éste es primo. Por tanto, la factorización completa de 1921 es 17×113.

Este método funciona bien en el caso de números relativamente pequeños, de territorios cercanos, pero falla con estrépito en regiones más remotas. En el caso de un número como 98.765.432.123.456.789, que sólo cuenta 17 dígitos, el número de divisiones a ensayar ronda en torno a 157 millones. En general, en el caso de números de n cifras, el método requiere alrededor de $\sqrt{n/2}$ tanteos. Si n tiene 100 cifras, el número de ensayos es del orden de 10^{50}; la más veloz máquina supercomputa-

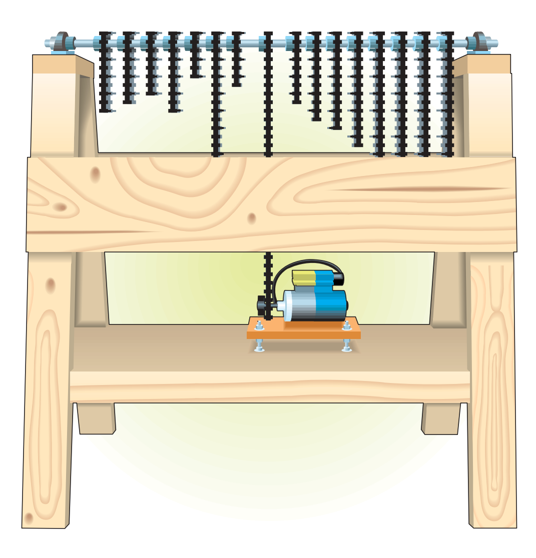
dora, suponiéndola en funcionamiento ininterrumpido desde el origen del universo, apenas si habría realizado una pequeña parte.

La estimación del tiempo que ha de estar funcionando un algoritmo forma parte de un parcela bastante nueva de las matemáticas, la “teoría de la complejidad”. Tales estimaciones se centran en el número de cifras decimales y no ven diferencias esenciales de complejidad entre $\sqrt{n/2}$ y $\sqrt{n}$. De hecho, $\sqrt{n}$ tiene, o bien el mismo número de cifras que $\sqrt{n/2}$, o sólo una más. A este tipo de razonamiento lo llamaremos “Ley de conservación de los grandes números”. En la calibración de la eficiencia de los diversos métodos procederé a simplificar así las expresiones, siempre que el número de cifras no cambie mucho.

Euclides demostró la existencia de infinitos números primos, por lo que la enumeración de éstos no acaba jamás. Su frecuencia, en cambio, sí va disminuyendo: Carl Friedrich Gauss conjeturó, y Jacques Hadamard y Charles de la Vallée Poussin demostraron, que el número de primos menores que n es, aproximadamente, $n/\log n$ (donde los logaritmos son “naturales”: de base $e = 2{,}71828...$). Parece como si los números primos estuvieran aleatoriamente dispersos. No es posible, sin embargo, que estén distribuidos al azar, aunque su aparición sí parece ser impredictible.

Existen muchas formas de demostrar que un número es primo sin tener que buscar sus divisores. Nos sirve de muestra el teorema de Wilson, de 1770, que afirma que n es primo si y solamente si n divide a $(n-1)! + 1$. En este caso $m! = 1 \times 2 \times 3 \times \ldots \times m$ es la función factorial. Por ejemplo, $10! + 1 = 3.628.801$ es divisible por 11, por lo que 11 es primo. Desdichadamente, desde el punto de vista de la complejidad, este método es todavía peor que el de los tanteos por división, porque exige efectuar aproximadamente n multiplicaciones, frente a los $\sqrt{n}$ ensayos por división del otro método.

Las pruebas de primalidad modernas se centran en un descubrimiento parecido que se remonta a la China antigua: si n es primo, será divisor de $2^n - 2$. Al parecer, los chinos creían también verdadero el teorema recíproco, en cuyo caso sería posible utilizar su criterio como demostración de primalidad. Ahora bien, ¿acaso no es cierto que para calcular $2^n - 2$ también harían falta unas n multiplicaciones, y ensayar luego su divisi-



2. Máquina numérica construida en 1926 para facilitar la búsqueda de números primos

bilidad por n? Curiosamente resulta no ser así, y es en este punto donde empezamos a efectuar incursiones serias en Ley de conservación de los grandes números.

Imaginemos, por seguir el razonamiento, que nos interesa saber si 107 es primo, y comprobar si divide a $2^{107}-2$. Parece, desde luego, que van a ser necesarias 106 multiplicaciones: 2, 2×2, $2\times2\times2$,... Pero hay otro método. Calculamos primero las potencias 2^2, 2^4, 2^8, y así sucesivamente, hasta 2^{64} en este caso, siendo los exponentes potencias de 2. El cálculo se efectúa por repetición de la elevación al cuadrado: $2^2=2\times2$, $2^4=2^2\times2^2$, $2^8=2^4\times2^4$, ..., $2^{64}=2^{32}\times2^{32}$. En total, seis multiplicaciones.

A continuación, expresamos 107 en notación binaria: $107=1101011$, lo que significa que $107=1\times64+1\times32+0\times16+1\times8+0\times4+1\times2+1\times1$; de aquí se sigue que $2^{107}=2^{64}\times2^{32}\times2^8\times2^2\times2^1$, cosa que exige sólo cuatro multiplicaciones más. En breve: podemos calcular 2^{107} con sólo 10 multiplicaciones; para nada se requieren 106.

Todavía mayor es la ganancia al aumentar el número. Un análisis de complejidad indica que el cálculo de 2^n mediante este procedimiento precisa a lo sumo $2\log_2 n+1$ multiplicaciones. En este caso, el $\log_2 n$ es el logaritmo de n en base 2, que es aproximadamente igual a 3,4 veces el número de cifras necesarias para expresar n en el sistema decimal. Así pues, para calcular 2^n cuando n tiene 100 cifras hacen falta solamente unas 340 multiplicaciones, y no las alrededor de 2^{100} que se precisarían para efectuar el cálculo multiplicando reiteradamente por 2.

El tamaño de los operandos, que va creciendo muy deprisa, podría ser causa de preocupación, pues los procesos de multiplicación se harán mucho más largos. Pero en la práctica no es necesario calcular 2^n-2 en toda su gloria: todo cuanto deseamos saber es si es divisible por n. El truco consiste en efectuar todos los cálculos módulo n, lo que significa despreciar los múltiplos de n siempre que aparezcan. Todos los números, en cualquier etapa del cálculo, pueden sustituirse por los restos de su división por n.

Para valores grandes de n, esta simplificación constituye una enorme diferencia. Supongamos que n tenga 101 dígitos. En tal caso, el valor "en bruto" de 2^n-2 poseerá unas $10^{99,5}$ cifras decimales. No se trata de 99,5 cifras, sino de 10 elevado a dicha potencia. El universo es demasiado pequeño para poder escribir ese número, incluso aunque se pudiera anotar un dígito en cada uno de los electrones existentes. Por contra, al realizar los cálculos aritméticos módulo 101, ninguno de los números manejados pasará jamás de 100 dígitos.

Aunque la observación de los chinos no constituye una prueba infalible de primalidad, sus excepciones —números n compuestos que dividen a 2^n-2, conocidos también por pseudoprimos en base 2— son raras. (Uno de los ejemplos característicos es $n=341=11\times31$.) Muchas de estas excepciones se abordan mediante una generalización del criterio chino, demostrada por Pierre de Fermat y conocida por "Pequeño Teorema de Fermat": Si n es primo, entonces n divide a a^n-a, cualquiera que sea a. En lugar de probar con 2^n-2 podemos, pues, usar 3^n-3, 5^n-5, y así sucesivamente. Hay, lo mismo que antes, excepciones que cumplen la nueva prueba de divisibilidad sin ser primos: se denominan pseudoprimos en base a. Ciertos números pueden ser pseudoprimos en varias bases: por ejemplo, $2701=37\times73$ es pseudoprimo en las bases 2 y 3. Pero es muy raro que un número sea pseudoprimo en una variedad de bases diferentes. El único número menor que 25.000 millones que es pseudoprimo en las bases 2, 3, 5 y 7 es 3.215.031.751, y ya no es pseudoprimo en la base 11. En consecuencia, la combinación de un pequeño número de pruebas similares a la china y conociendo esta única excepción, podemos averiguar rápidamente si un número cualquiera, menor que 25.000 millones, es primo o compuesto.

Acuse de recibo

La respuesta más insólita al artículo de enero, dedicado a los calendarios, fue un disco compacto enviado por Bob Gramann, titulado *Mostly True Songs*, cuya cuarta canción especula con la posibilidad de un calendario de base decimal.

John S. Young describió un sistema para llevar mentalmente el calendario. Se parte de un código anual, el número de años transcurridos desde 1900 más el número de años bisiestos ocurridos desde entonces (contado el 1900), módulo 7. Se suma un código mensual, deducido formando un total variable mod 7 del exceso de cada mes sobre 28. Se suma la fecha, módulo 7 como antes. Entonces 0-6 representan los días domingo, lunes,..., sábado. Otros lectores propusieron métodos similares.

Uno de ellos, Robert Eisenberg, expuso el fascinante teorema de que, en un año cualquiera, bisiesto o no, todas las fechas, desde 1 a 31, caerán en cada uno de los posibles días de la semana. (Es decir, el primero de mes será martes al menos una vez al año, y así con los demás.) También mostró cómo hallar los años que tienen el número máximo de viernes y 13; uno de tales años será 1998. (Lo que recuerda una de las viñetas de Pogo que dibuja Walt Kelly, en la cual el "golpe" era que "Este mes, el viernes 13 cae en martes".) Charles D. Reed y Ken Wood me enviaron métodos para hallar el día de cualquier fecha, sea del calendario gregoriano o juliano. Y Peter Baum explicó cómo obtener de forma sencilla el "Rata Die", basándose en cálculos de un "año" que comienza el 1 de marzo. Los lectores deseosos de más detalles pueden contactar con él en pbaum@capecod.net.

LIBROS

Juegos matemáticos

El universo en un pañuelo

THE UNIVERSE IN A HANDKERCHIEF, por Martin Gardner. Editorial Copernicus; Nueva York, 1996.

Si un gato necesita un minuto para matar un ratón, ¿cuanto tiempo necesitará para matar 60.000 ratones? Lewis Carroll sugiere que la respuesta es imposible, ya que muy probablemente los 60.000 ratones habrán dado buena razón, mucho antes, del gato. El reverendo Dogson inventó, sin embargo, "la prueba" para demostrar que, si una bolsa contiene dos trozos de mármol y tiene que haber siempre en ella mármol blanco y negro, es seguro que habrá un trozo negro y otro blanco.

Este librito, debido a Martín Gardner, ilustra sin agobiar la rara habilidad de Charles Ludwig Dogson para adaptar a su tiempo, y para combinar originalmente, las sorpresas matemáticas y las contradicciones lógicas, perceptivas y semánticas, acumuladas desde los caldeos hasta el final del siglo XIX. Habilidad no exenta, como nos dice Gardner, de intuición, humor y originalidad. Porque la botella de Klein fue intuida por Carroll en los dobleces de un pañuelo, y muchas de las proposiciones de Gödel se encuentran ya descritas en los trabajos del maestro de matemáticas de la Christ Church de Oxford. En las aventuras de Alicia y en los papeles y pequeños prontuarios, algunos inéditos, que Gardner nos presenta en esta cuidada edición, Carroll incluye, y muchas veces oculta, criptogramas, números con sorprendentes propiedades, acrósticos y paradojas, juegos de cartas y palabras.

Sin duda, Gardner que, además de matemático, es un carrolliano singular, un explorador e investigador de los secretos de Alicia, a la que ha anotado y glosado con singular maestría y erudición, conoce muchos de los antecedentes en que se apoyó el descubridor de Alicia para sus aventuras en el campo de la aritmética y de la matemática lógica. Debemos lamentar que su amor por Carroll sea tan grande, que no parece tener excesivo interés en desvelarlos.

El matemático griego del siglo III Diofanto nos proponía ya algunos de los juegos y problemas matemáticos y lógicos que Carroll utiliza y recrea de forma magistral. Averroes, Alfarabi, el cordobés Ibn al-Arabi, y muchos de los llamados flatunitas (de al-Flatún, Platón) habían reaccionado, sin embargo, contra esta actitud contemplativa de los aritméticos griegos, con proposiciones similares al problema del gato y los ratones.

En nuestras universidades medievales, fuertemente influenciadas por el estilo árabe de pensamiento, esta afición, mitad contemplativa mitad mágica, por las propiedades de los números, las letras y las palabras, dio lugar, andando el tiempo, a multitud de proposiciones para resolver los enigmas, falsos o verdaderos, sustentados sobre las propiedades de los números y las convenciones de la lógica formal o presuntamente aristotélica. A Ozanam, Fibonacci y Alcuino, hay que añadir los trabajos de Lucas, Laisant, Gamow, Sam Loyd y, desde luego, el de Martin Gardner, a partir de su afición por sorprendernos con brillantes ejemplos del contraste entre la razón y el misterio.

En la Edad Media ya era popular el falso diálogo entre Platón y Sócrates. A la afirmación de Platón de que, siempre que hablaba, Sócrates mentía, este le responde asegurando que el maestro tenía razón. Y en una carta que Carroll escribió a una de sus hermanas, publicada más tarde en una hojita parroquial, *The Rectory Umbrella*, el reverendo nos asegura que entre un reloj en marcha que, al menos una vez al año, marca la hora con exactitud, y otro que está parado a las ocho en punto, este último tiene la ventaja de ser igual de preciso dos veces al día, el autor de *Alicia en el País de las Maravillas* nos dice que cuantos más reproches haga el lector a este razonamiento, más se alejará de la cuestión.

Ningún reproche puede hacerse a este delicioso libro en el que Martin Gardner ha conseguido renovar nuestra admiración por Lewis Carroll.

JOSÉ ANGEL SÁNCHEZ ASIAIN

Cosmología

Años decisivos

COSMOLOGY AND CONTROVERSY. THE HISTORICAL DEVELOPMENT OF TWO THEORIES OF THE UNIVERSE, por Helge Kragh. Princeton University Press; Princeton, 1996. **MACH'S PRINCIPLE: FROM NEWTON'S BUCKET TO QUANTUM GRAVITY**. Dirigido por Julian B. Barbour y Herbert Pfister. Birckhäuser; Basilea, 1995.

THE MEASUREMENT OF STARLIGHT. TWO CENTURIES OF ASTRONOMICAL PHOTOMETRY, por J. B. Hearnshaw. Cambridge University Press; Cambridge, 1996. **YERKES OBSERVATORY, 1892-1950**, por Donald E. Osterbrock. The University of Chicago Press; Chicago, 1997.

ALEXANDER A. FRIEDMANN: THE MAN WHO MADE THE UNIVERSE EXPAND, por Eduard A. Tropp, Viktor Ya. Frenkel y Arthur D. Chernin. Cambridge University Press; Cambridge, 1993. **EDWIN HUBBLE, THE DISCOVERER OF THE BIG BANG UNIVERSE**, por Alexander S. Sharov e Igor D. Novikov. Cambridge University Press; Cambridge, 1993.

La cosmología, si por tal entendemos el estudio científico del universo, nació en los años veinte, al calor de la teoría general de la relatividad einsteiniana. Helge Kragh ha escrito una obra maestra sobre su parto y las dos principales interpretaciones que del origen y estructura del cosmos han persistido desde entonces con fortuna dispar. *Cosmology and controversy* nos va a servir de programa de mano en una representación cuyas escenas y cuadros protagonizan los restantes libros de cabecera. No se trata de aportar una respuesta sobre la razón de la existencia del cosmos —esa cuestión, ha escrito Dennis Sciama, se nos escapa—, sino de entender cómo es el universo.

La controversia que desmenuza Kragh es la mantenida entre los defensores del universo estacionario y los partidarios del universo evolutivo; di-

cho de otro modo, un universo de edad infinita y un universo con un comienzo temporal. En su arranque, sin embargo, ambas corrientes partieron de unos mismos principios relativistas, fundados, a su vez, de acuerdo con el propio Einstein, sobre el principio de Mach. A la interpretación y alcance de éste se dedicó un simposio en 1993, transcrito en *Mach's principle: from Newton's bucket to quantum gravity*.

Hay en la historia de la física reciente una gavilla de axiomas que sobresalen por su potencia a la hora de abordar la naturaleza de la materia y sus interacciones, el espacio, el tiempo y otras cuestiones básicas. Recuérdese, a este propósito, el principio atómico, el principio cosmológico, el principio de conservación de la energía, el principio de equivalencia, el principio de la paridad o el principio cuántico. El principio de Mach se sitúa en parejo rango.

Ernst Mach planteó, en *La ciencia de la mecánica: relato crítico e histórico de su desarrollo*, varias objeciones a las leyes del movimiento de Newton. Entre ellas, la relatividad del movimiento, idea de una simplicidad subyugante: afirmar que un cuerpo se mueve es afirmar que se mueve respecto a otro. Cuando uno dice, razonaba, que un sistema o cuerpo sobre el cual no actúan fuerzas se halla en reposo o en movimiento uniforme, hemos de preguntarnos "uniforme respecto a qué". Para Newton, respecto a un espacio absoluto. Pero éste, replica Mach, es un elemento metafísico que puede sustituirse por la totalidad de las masas cósmicas, de manera más precisa, por las estrellas fijas que establecen un sistema rígido de referencia. Los conceptos de energía o entropía del universo carecen de sentido porque suponen la aplicación de nociones mensurables a un objeto que era inaccesible a la medición. Las ideas de reposo y movimiento estarían, pues, privadas de significado a menos que exista un marco en referencia al cual se mida el movimiento. Nada tiene de extraño que el principio gozara del aplauso de los filósofos de la ciencia, que lo tomaron por paradigma de la interrelación entre física y filosofía, en particular Hans Reichenbach.



Refractor de 40 pulgadas de Yerkes

Einstein habló del "principio de Mach" en *Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie* (1918), artículo donde expresa lo que él considera las exigencias de Mach sobre la inercia: el campo G está determinado por las masas de los cuerpos. Puesto que la masa y la energía son, en virtud de la teoría especial de la relatividad, iguales, y puesto que la energía está formalmente descrita por el tensor simétrico de energía, el campo G se halla condicionado y determinado por el tensor de energía.

Einstein sembró la semilla de su revolución cosmológica en las ecuaciones gravitatorias de la teoría de la relatividad general. Dibujaba un universo que era un continuo espacialmente cerrado, "esférico" en cuatro dimensiones. Este cosmos, espacialmente finito, era estático y contenía una cantidad limitada de materia. La teoría cosmológica de Einstein apareció en plena guerra mundial y apenas se difundió más allá de las fronteras de Alemania. Pero Einstein mantenía relación con Willem de Sitter, profesor de la Universidad de Leyden, conocido por su trabajo en mecánica celeste. A diferencia de lo que afirmaba Einstein, De Sitter mostró que el modelo estático y lleno de materia no era la única solución de las ecuaciones de campo. Antes bien, admitía un universo vacío, espacialmente cerrado pese a su falta de materia. Agregaba una propiedad peculiar: si una partícula se situaba a una distancia r del origen de un sistema de coordenadas, nos aparecería alejándose del observador.

Numerosos astrofísicos se apresuraron a desentrañar y refinar los dos modelos cosmológicos. Lo habitual fue proponer soluciones que combinaban aspectos del planteamiento de Einstein y de De Sitter. Eran, pues, en definitiva modelos estáticos, salvo dos excepciones: la de Friedmann en 1922 y la de Lemaître en 1927. Sin embargo, para entender el trasfondo y la base empírica, la llamada astronomía observacional, conviene cortar antes otros dos libros: *The measurement of starlight* y *Yerkes Observatory*.

J. B. Hearnshaw prosigue en *The measurement of starlight*, dedicado a la fotometría estelar, o ciencia de la medición de las magnitudes y colores de las estrellas, la labor realizada en *The analysis of starlight*, sobre la evolución de la espectroscopía estelar. En todos sus estadios, la fotometría estelar ha avanzado al paso de las técnicas disponibles de detección e instrumentación. Así, a modo de peldaños, se han ido escalando la fotometría visual, la fotometría fotográfica, la fotometría de fotomultiplicador y la fotometría con dispositivo acoplado de carga. De las tres primeras se ocupa este libro, que llega hasta 1970. De la última tiene el lector abundante noticia en los artículos de astrofísica que publica periódicamente la revista.

Pierre Bouguer, fundador de la fotometría, estudió el decrecimiento de la intensidad de los rayos luminosos a través de un medio absorbente. Se emplearon dos tipos de fotómetros. Los de extinción se basaban en la reducción del brillo de una imagen en una cuantía conocida hasta hacerla invisible. Los fotómetros de comparación, que se servían del cotejo visual del brillo de dos imágenes, cambiaban la intensidad de al menos una de ellas hasta conseguir un brillo equiparable de las dos. A principios del siglo XX la fotometría visual cayó en desuso, dejando paso a los métodos

fotográficos. Pero sus logros no fueron desdeñables: adopción universal de la escala de Pogson, extensión de las mediciones fotométricas a las estrellas débiles, corrección de magnitudes fotométricas para la extinción atmosférica, catalogación fotométrica de todas las estrellas hasta la magnitud 7,5 y descubrimiento de nuevas estrellas variables.

Un hallazgo fortuito de Hermann Vogel en 1873 posibilitó la invención de placas sensibles a la luz verde, amarilla y naranja, así como a la región espectral del azul-ultravioleta. Pero sería Karl Schwarzschild quien transformó la fotometría fotográfica en ciencia exacta. Investigó la ley del ennegrecimiento de las placas fotográficas. (El ennegrecimiento depende de la expresión *It*p, donde *I* es la intensidad, *t* el tiempo de exposición y *p* el índice de Schwarzschild.)

La obtención de la Secuencia Polar Septentrional dominaría la fotometría fotográfica durante la primera mitad del siglo XX. Henrietta Leavitt descubrió variables en las Nubes de Magallanes con un método ingenioso, que consistía en producir una copia positiva de una de las placas y luego superponer los otros negativos sobre el positivo. Las imágenes de las estrellas variables, vistas a través de las dos placas en contacto, se identificaban fácilmente. Ejnar Hertzsprung capitalizó el descubrimiento de Leavitt y aportó la primera calibración de la ley del período-luminosidad de las Cefeidas y, con ello, la primera determinación de la distancia a un objeto extragaláctico.

Obviamente la labor de los astrónomos estaba ligada a un observatorio. El rendimiento y la orientación temática del mismo dependía de quien estuviera al frente. Esa excesiva vinculación queda evidenciada en el libro de Donald E. Osterbrock, *Yerkes Observatory, 1892-1950.* Yerkes celebra este año el centenario de su inauguración formal. Queríase que fuera ejemplo de investigación de punta, para lo que se le dotó de un telescopio refractor de 40 pulgadas, "el mayor y el mejor del mundo".

Pretendía George Ellery Hale, su fundador y primer director, que Yerkes se dedicara a una rama entonces novedosa, la astrofísica (el estudio de la naturaleza física de las estrellas, nebulosas, galaxias y planetas). La espectroscopía, su herramienta maestra, había progresado a pasos agigantados desde que Gustav Kirchoff y Robert Bunsen reconocieron los mismos elementos en el Sol y en la Luna que los que habían encontrado analizando la Tierra.

Además de ocuparse de la infraestructura, humana y técnica, Hale previó la importancia de una revista de investigación donde aparecieran los trabajos realizados y constituyera un estímulo. Así nació en Yerkes el *Astrophysical Journal*. Menos afortunado fue en sus trabajos iniciales sobre espectros, pues apenas se limitó a confirmar lo que se sabía sobre la familia de estrellas de cuarto tipo: que en ellas dominaban los compuestos moleculares del carbono. Pero en Yerkes fue donde Hubble realizó su trabajo sobre nebulosas débiles, germen de numerosas ideas que tendrían sistematización en el modelo de un universo en expansión.



Alexander Alexandrovich Friedmann

El mérito de la matematización de la expansión del universo corresponde por entero a Friedmann (véase *Alexander A. Friedmann: The man who made the universe expand*). Nacido en San Petersburgo en 1888, murió a los 37 años. Antes de entrar en la universidad había ya leído un largo y denso elenco de manuales y tratados matemáticos: *La teoría de las congruencias* de Chebyshev, *Algebra superior* de Sokhostky, *Elementos de álgebra* de Euler, obras de Dirichlet, Dedekind, Legendre, Markov, Zolotarev, Bachmann y Hilbert en teoría de números; de Sokhostky y Weber en álgebra superior; de Serret, Soltz, Cauchy, Picard y Jordan en análisis; de Bobylev, Appell, Riemann, Poincaré y Clausius en mecánica y física matemática; de Andreyev, Bukreyev, Bianchi y Lamé en geometría. En su solicitud de ingreso en la universidad, añadía lo siguiente al certificado escolar: "En la teoría de congruencias obtuvo una fórmula que expresa el número de congruencias de una forma general y desarrolló de manera particularizada la solución de congruencias de segundo grado; Hilbert aceptó la publicación de un artículo suyo sobre esta cuestión en los *Math. Annalen* de Leipzig."

Pero hasta los años veinte Friedmann no aborda el estudio sistemático de la relatividad. La naturaleza del espacio y el tiempo se vinculaba en la nueva teoría con la distribución y movimiento de las masas gravitatorias en el universo. Pero a él no le importa tanto la física cuanto la matemática de la relatividad, en particular el cálculo tensorial. Los dos artículos fundantes de la dinámica evolutiva del universo, escritos en 1922-1923 y publicados en *Zeitschrift für Physik*, portan títulos harto austeros: "Sobre la curvatura del espacio" y "Sobre la posibilidad de un mundo con curvatura negativa constante".

En el primer artículo, tras reconocer las aportaciones de Einstein y de De Sitter, formula su intención: indicar la posibilidad de obtener un mundo donde la curvatura del espacio, siendo constante con respecto a las tres coordenadas espaciales, cambie con el tiempo. Arriba así a dos tipos básicos de universo: el tipo estacionario, en el que la curvatura del espacio no cambia con el tiempo, y el tipo variable, en el que la curvatura del espacio cambia con el tiempo. En el primero, el universo se asimila a una esfera de radio constante. El segundo tipo de

universo puede ilustrarse como una esfera siempre cambiante, ya expandiéndose en sí misma, ya contrayéndose. El tipo estacionario comprende sólo dos casos, los considerados por Einstein y De Sitter. El tipo variable de universo abarca una amplia diversidad de casos. La expansión del mundo empieza a partir del estado en que el espacio es un punto, lo que significa que la densidad inicial del mundo es infinitamente grande. A ese estado único se le llama singularidad cosmológica. En "Sobre la posibilidad de un mundo con curvatura negativa constante" ahonda en la dinámica del mundo y su geometría.

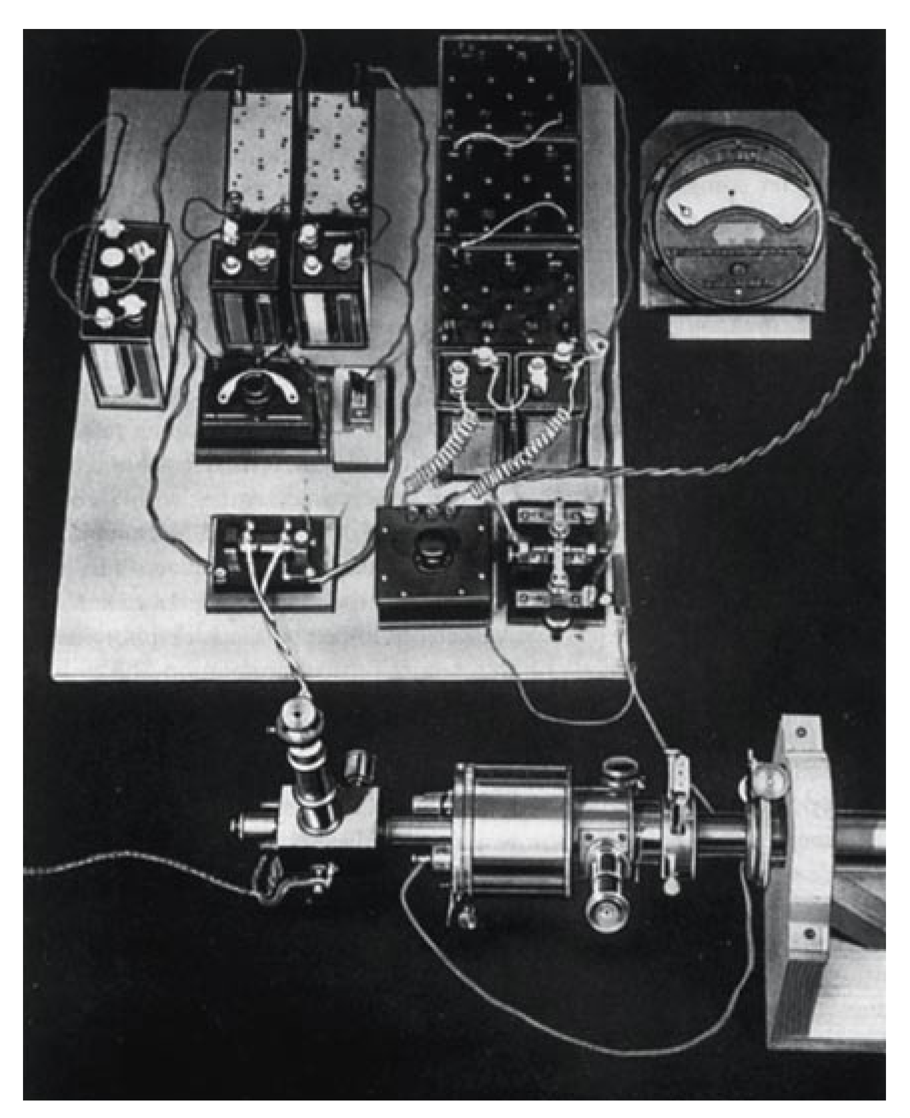
No le gustó a Einstein la tesis que Friedmann desarrollaba. Mostró su protesta en sendas cartas a la redacción de *Zeitschrift*, a través de las cuales reiteraba su idea de un universo estático y ponía en duda la corrección de los cálculos de aquel obscuro ruso. Friedmann repasó de nuevo su trabajo y se afirmó en sus resultados. El tiempo y Einstein terminaron por darle la razón. "El honor de Petrogrado se había salvado", exclamó entonces Yuri Krutkov, quien coincidió con Einstein en Leyden y era amigo de Friedmann.

Friedmann predijo un universo en expansión, pero no *el* universo en expansión. Es decir, demostró que entre las soluciones de las ecuaciones de campo cosmológicas había algunas que debían interpretarse como un universo en expansión. No predijo, ni explicó, que hubiera sólo un universo real de este tipo. Su entero análisis estuvo limitado a la matemática, sin ningún interés por incorporar física o astronomía. En eso reside la radical diferencia entre Friedmann y Lemaître.

Georges Edouard Lemaître nació en Charleroi en 1894. Empezó la carrera de ingeniería en la Universidad Católica de Lovaina, pero tuvo que abandonar las clases para participar en la defensa de su país contra la invasión alemana de 1914. Estudió luego física y matemática en el mismo centro superior. También teología, ordenándose sacerdote. Eddington, con quien trabajaría muy pronto en Cambridge, lo describe como "alumno brillantísimo, de mente clara y ordenada, y de extraordinaria potencia matemática". Pasó varios años en el Observatorio de Harvard y se doctoró por el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Durante esa estancia se produjo su transición de la física matemática a la astronomía teórica. En seguida captó la importancia del descubrimiento de Hubble de las Cefeidas en las galaxias espirales y visitó a Vesto Slipher (en Lovell) y a Edwin Hubble (en Monte Wilson) para conocer de primera mano las mediciones más recientes de los corrimientos hacia el rojo. La consecuencia de ello fue su primer artículo sobre el universo no estático con una relación entre corrimiento hacia el rojo y distancia, precursor del universo en expansión.

El establecimiento de una relación empírica entre el corrimiento hacia el rojo y distancia se convirtió en una realidad en 1929 a través de la obra de Hubble (véase *Edwin Hubble, the discoverer of the big bang universe*). Había nacido éste un año después de Friedmann, pero le sobrevivió 28 más. De él se ha dicho que ha sido el mayor astrónomo observacional desde Copérnico. Y nadie discute que cualquiera de sus tres grandes logros —descubrimiento de galaxias, demostración de que eran los componentes típicos de la macroestructura del universo y establecimiento de la gran explosión— hubiera bastado para asegurarle un lugar de honor en la historia. Sus aportaciones decisivas se produjeron entre mediados y finales de los años veinte.

Hubble abrió el mundo de las galaxias a la ciencia, cuando demostró que las nebulosas exteriores a la Vía Láctea eran gigantescos sistemas estelares. Sin embargo, su descubrimiento más importante fue el del corrimiento hacia el rojo en los espectros de las galaxias, que depende de su lejanía de nosotros y constituye quizás el rasgo más revelador del mundo que nos rodea. La relación del corrimiento hacia el rojo en función de la distancia significa que el mundo de las galaxias se está expandiendo. Por consiguiente, el universo era en el pasado mucho



Fotómetro de Adolf Lindemann, de 1926

más chico. Extrapolando hacia atrás, la física contemporánea ha demostrado que el universo primordial era diferente en todo, en los estados de materia y radiación y en los procesos de desarrollo violento y en rápida evolución. Hubble descubrió lo que ahora conocemos por *big bang*, la gran explosión inicial que dio origen a nuestro universo. El nacimiento explosivo del universo determinó su evolución subsecuente.

En 1922 presentó en *Astrophysical Journal* un artículo titulado "General Study of Diffuse Galactic Nebulae". Clasificaba las nebulosas en dos tipos: nebulosas galácticas conectadas con la banda de la Vía Láctea, y nebulosas extragalácticas en altas latitudes, que se hallan ausentes del plano de nuestro sistema estelar. No se había establecido todavía que estos últimos objetos residen allende nuestra galaxia, que son sistemas estelares parecidos al nuestro aunque remotísimos. Hubble acometerá su estudio. Conocidas las distancias a las nebulosas, procedió a medir su luminosidad real. Vio que las magnitudes absolutas de las nebulosas eran muy similares. Se abría así un camino para deducir de las magnitudes estelares aparentes las distancias a las nebulosas.

En 1926 y 1929, Hubble publicó dos artículos fundamentales, de título casi idéntico: "A Spiral Nebula as Stellar System Messier 33" y "A Spiral Nebula as Stellar System Messier 31", donde compendiaba todo su trabajo realizado. Demostraba que las estrellas nebulares de M33 eran estrellas ordinarias. Halló entre ellas 42 estrellas variables, 35 de las cuales eran Cefeidas. El problema no estaba en el escaso número de velocidades radiales medidas ni en su imprecisión, sino en el grado de incertidumbre en la evaluación de las distancias de las nebulosas. Hubble sabía que se había ya insinuado la vinculación del corrimiento hacia el rojo con la distancia a las galaxias. Había analizado el modelo relativista de De Sitter y verosímilmente pensó en someter a prueba las predicciones de los teóricos, pese a su escaso entusiasmo por las teorías.

Quien si sometió los modelos relativistas del mundo a una investigación sistemática fue, de vuelta a Lovaina, Lemaître. Reprodujo, sin saberlo entonces, los resultados de Friedmann. Pero su obra no sólo era independiente de la de Friedmann, sino que también difería en aspectos muy importantes. Con una curvatura del espacio dependiente del tiempo halló ecuaciones diferenciales del mismo tipo de las de Friedmann, pero incluyendo una presión de radiación. Lemaître mostró explícitamente que las ecuaciones cosmológicas podían satisfacerse por un universo en expansión en que el radio del universo creciera sin límite.

En la primera mitad de los años treinta la teoría del átomo primigenio de Lemaître, según la cual el mundo empezó constituido de ese modo, comenzó a ganar predicamento en Inglaterra. Tenía su razón de ser: hasta entonces, las teorías atómicas y subatómicas de la constitución de la materia no se habían asomado a la escena cosmológica. La tesis de Lemaître suponía el primer intento por establecer una cosmología que tomara también en consideración los procesos microfísicos y realizara predicciones de naturaleza física.

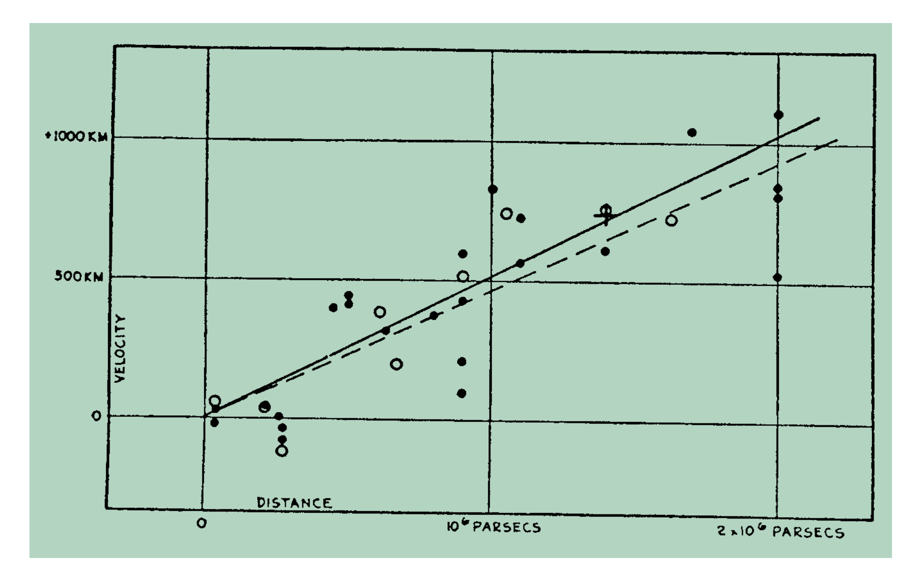


Diagrama con que Hubble representó, en 1929, las velocidades aparentes de las galaxias en función de sus distancias, donde se aprecia una razonable correlación lineal. Las dos líneas, la continua y la segmentada, designan dos modos diferentes de reducir los datos de acuerdo con el movimiento del Sol

En ese decenio se multiplican los modelos cosmológicos, muchos de ellos opuestos a la teoría relativista. Doctrinas de vida efímera en su mayoría, algunas ejercieron un influjo duradero; en concreto, la teoría de Milne y la de Dirac (esta última generalizada por Jordan). Ambas, empero, aceptaban la idea de una gran explosión y representaban el universo arrancando de un estado parecido a una singularidad. Edward Arthur Milne, figura destacada por sus notables contribuciones al estudio de las atmósferas estelares y estructuras, era un antirrelativista militante. Entendía el espacio como un sistema de referencia, no como un objeto de observación, y, por tanto, podía carecer de estructura, curva o no. Su propio modelo de universo suponía un espacio plano, euclideano e infinito. La expansión del universo, expuesta en *Relativity*, *Gravitation, and World-Structure*, sólo requería dos postulados: la constancia de la velocidad de la luz y el principio cosmológico (en virtud del segundo, que él formuló en 1933, el universo debe parecer el mismo para cualquier observador, cualquiera que sea su posición).

Dirac, por su lado, aunque aceptaba una teoría de la gran explosión *à la Lemaître*, abogaba por una reconsideración de la cosmología fundada en grandes números adimensionales, que pueden inferirse de las constantes fundamentales de la naturaleza. Concedió particular significación a los números de órdenes de magnitud 10^{39} y 10^{78} (este último = $(10^{39})^2$). Relacionó la edad del universo con la razón entre las fuerzas electrostáticas y gravitacionales entre el electrón y el protón.

Con todo, el universo de la gran explosión suele asociarse a George Gamow y no a Lemaître. Hay cierto fundamento para ello. Gamow, físico nuclear, concebía el universo primitivo como un horno nuclear donde los elementos que constituyen nuestro universo actual se cocinaban. El cosmos nacía de reacciones nucleares en un estado superdenso de materia nucleónica.

En septiembre de 1946 Gamow envió un artículo a *Physical Review*, que algunos señalan como el funda-

mento de la moderna cosmología de la gran explosión. Imaginaba allí el universo primitivo constituido por una sopa fría (y espesa) de neutrones. Más tarde se vio que esa hipótesis llevaba a contradicciones con los datos de observación. En efecto, después de la creación, un neutrón en estado libre se desintegra al cabo de unos 15 minutos, transformándose en un protón, un electrón y un antineutrino. Los protones creados en el universo se enlazarían con los neutrones supervivientes y formarían los núcleos de átomos de deuterio. Más tarde, la cadena de reacciones nucleares produciría átomos de helio. Por tanto, toda la materia del universo se habría convertido en helio. Lo que está en evidente contradicción con lo observado. Sabemos que la mayor parte del universo consta de hidrógeno, no de helio.

En 1948, con su colaborador Ralph Alpher envió otro artículo a *Physical Review*. El universo primitivo que allí aparecía era un gas de neutrones caliente, densamente comprimido, que en cierto instante inicial comenzó a desintegrarse en protones y electrones. La densidad de la materia era altísima en el comienzo de la expansión. Los procesos dominantes fueron las reacciones nucleares que acontecieron durante los primeros instantes a densidades altísimas de materia y radiación. Las reacciones produjeron más tarde elementos químicos ligeros. Del cálculo de las características de las reacciones nucleares se infiere la composición química de la materia a partir de la cual se formaron más tarde los cuerpos celestes.

En las postrimerías de los años cuarenta, apareció en Cambridge una teoría diametralmente opuesta, la cosmología del estado estacionario. Los rasgos básicos de esta teoría, defendida por Fred Hoyle, Hermann Bondi y Tommy Gold, se contenían en dos postulados interrelacionados: Primero, que el universo ha tenido y tendrá siempre el mismo aspecto para cualquier observador; éste es el principio cosmológico perfecto. Segundo, que la materia se está creando continuamente a través del universo, emergiendo espontáneamente.

La teoría del estado estacionario provocó un arduo debate al poner en cuestión hipótesis aceptadas de la teoría relativista. Tuvo a su favor que despertó la atención de físicos y astrónomos sobre los fundamentos de la cosmología. Pese a sus guadiánicas reapariciones, es manifiesto que la mayoría de los cosmólogos ven más coherente la teoría de la gran explosión.

LUIS ALONSO

Comercio español

Aportación vasca

COMERCIANTES, MINEROS Y NAUTAS. LOS VASCOS EN LA ECONOMÍA AMERICANA. Dirigido por R. Escobedo Mansilla, A. de Zaballa Beascoechea y O. Alvarez Gila. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco; Vitoria, 1996.

La obra se compone de veintiún trabajos monográficos que recogen la incidencia y participación vasca en el desarrollo económico de América. Empieza con una introducción de los coordinadores, donde se sintetiza la presencia de los vascos en los sectores de la construcción naval, la minería y el comercio americanos, en las capitales de los virreinatos —Lima y México— y los puertos más concurridos del Nuevo Mundo.

A continuación, Antonia Heredia Herrera trata de la presencia vasca en el Consulado de Sevilla y proporciona la lista de cuantos tuvieron relación con tal institución. Le sigue un trabajo de M.ª del Carmen Borrego Pla dedicado al estudio de un personaje apellidado Oyarzábal residente en el Puerto de Santa María. Angeles Lavín Torres, por su parte, nos ilustra sobre las consecuencias de la libertad de comercio de Santander y la problemática de la deserción de los tripulantes. Seguidamente, Jesús Varela Marcos nos habla de la escasez de marineros en las flotas y de los intentos de solucionarla.

Del asentamiento de comerciantes vascos en la audiencia de Quito y Guayaquil se ocupa Agueda Rivera Garrido. Vida azarosa fue la que tuvo, a ambos lados del Atlántico, la institución guipuzcoana estudiada por Adelaida Sagarra Gamazo: la matrícula de mar. Ana María Rivera Medina refleja la construcción de naves en el astillero de Zorroza, tanto en el aspecto de suministros como de personal. Fernando Fernández González analiza las funciones de los maestres de las naos y trata de los vascos que desempeñaron ese cargo, hasta un número de 154 identificados.

Analiza Lutgardo García Fuentes el papel de los comisionistas vascos en la articulación comercial del virreinato del Perú con el mercado hispalense, en época de auge del comercio interindiano. La minería propició ese hecho y ésta a su vez condujo a la hegemonía económica y comercial de Lima y El Callao. No deja de ser llamativo el caso, historiado por Julia Gómez Prieto, de la familia Urrutia, vizcaína de los inicios del siglo XVI, dedicada muy pronto al tráfico de esclavos africanos.

En 1759 se establecieron relaciones permanentes entre España y Rusia lo que propició el comercio que, según cuenta Víctor Javier Vega Viera, se canalizó a través de puertos vascos. Corsarios vascos hubo contra Inglaterra en la guerra de 1779 a 1783, que Rocío Casas de Bustos vincula con los perjuicios sufridos por la Real Compañía Guipuzcoana de Caracas, bastante afectada ya por la liberalización del comercio de 1778, como consecuencia de los corsarios ingleses. Dicha compañía es objeto de diversas investigaciones que abordan distintos aspectos en sendos trabajos de María Teresa Zubiri Marín, Gerardo Vivas Pineda, María José Nestares Pleguezuelo y Elisa María Jiménez Jiménez.

Montserrat Gárate Ojanguren analiza el caso de una empresa atípica, la Real Compañía de La Habana, con sede inicial en aquella ciudad. Isabel Miguel López habla de la relación vasca con América, aportando la lista nominal de los tripulantes que se quedaron allí, y, además, la de los sobrecargos y comerciantes relacionados con el Nuevo Mundo. John Fisher trata de las misiones enviadas por la Corona a América con el propósito de mejorar la explotación de la plata. Y finalmente, Miguel Molina Martínez destaca el declive de la producción de la plata entre 1811 y 1824 y analiza las propuestas hechas por mineros y políticos vascos para reactivarla.

En conjunto, los trabajos reunidos en la obra están muy elaborados y bien documentados, como es de esperar en una publicación de estas características, y aportan una excelente visión de la participación vasca en el comercio y articulación del Nuevo Mundo, facilitando al mismo tiempo el conocimiento de muchos aspectos que hicieron posible el desarrollo y progreso de Indias, y que suscitarán, sin duda, el interés de los lectores.

LAUREANO CARBONELL

Joseph Ryan, Jr.

Etiquetas antirrobo

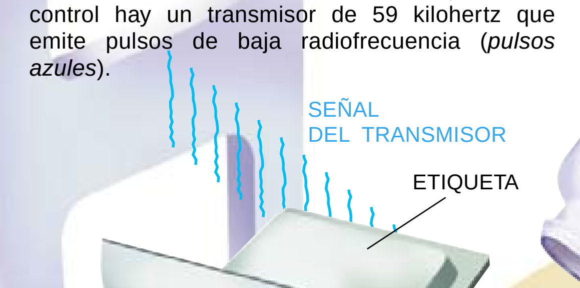
La etiquetas de plástico sujetas a los artículos de consumo son cual diminutos centinelas que contribuyen al incesante esfuerzo de los minoristas por reducir los miles de millones de pesetas que el país paga cada año a la ratería en tiendas y grandes almacenes. Idea original del director de unos almacenes que no pudo correr más que un ratero, las etiquetas antirrobo sujetas a los artículos de venta comunes, desde los lomos de los libros hasta los envases de alimentos, sirven para identificar al comercio propietario del artículo.

Los componentes principales de estos sistemas antirrobo son las mismas etiquetas y un transmisor y un receptor combinados con una alarma que crea una “zona de interrogación” en la entrada a los almacenes o en el pasillo de control. En muchos de los sistemas de la primera generación, todavía en uso, las etiquetas contienen diodos semiconductores que modulan una señal de microondas procedente del transmisor y “devuelven una respuesta” a un receptor y éste hace sonar una alarma. Los rateros pueden burlar estos equipos escondiendo lo hurtado dentro de gabanes o en sacos forrados de papel metálico. Además, los clientes pueden crear falsas alarmas cuando lleven a los almacenes aparatos electrónicos que imiten las características transmisoras de los diodos de las etiquetas.

Se ha diseñado una nueva generación de etiquetas, basadas en principios “magnetoacústicos”, que funcionan en una banda estrecha de baja radiofrecuencia cuidadosamente elegida. Las frecuencias seleccionadas minimizan las interferencias de otros aparatos electrónicos. En estos sistemas, las etiquetas contienen un resonador hecho de un metal magnético amorfo de una longitud y un espesor muy precisos, el cual es excitado por señales de baja radiofrecuencia generadas por un transmisor instalado en la entrada al recinto. El resonador vibra a la misma frecuencia y así emite una señal idéntica. Un receptor situado en la entrada que detecta la señal del resonador dispara entonces la alarma.

LOS ARTICULOS A LA VENTA pueden llevar una etiqueta antirrobo (*dentro del círculo rojo*) cosida al tejido, pegada al envase o dentro de un sobre higiénico e introducida entre el contenido.

1 ENTRE DOS CABALLETES que abarcan la entrada a los almacenes o limitan un pasillo de control hay un transmisor de 59 kilohertz que emite pulsos de baja radiofrecuencia (*pulsos azules*).



2 UN RESONADOR contenido en la etiqueta de un artículo que pase entre los caballetes empieza a vibrar a 58 kilohertz, frecuencia igual a la del transmisor.

3 UN RECEPTOR encerrado en uno de los caballetes se enciende durante los 11 milisegundos que median entre cada dos pulsos del transmisor; puede, pues, captar la señal idéntica (*pulsos rojos*) emitida por la etiqueta. Si recibe una señal al menos cuatro veces, dispara una alarma.

4 UNA BANDA MAGNETIZADA contigua al resonador fija la frecuencia del mismo exactamente a 58 kilohertz. Un dispositivo de barrido situado en el mostrador de control puede desactivar una etiqueta cuando se vende el artículo desmagnetizando la banda o bien alterando sus características magnéticas. Entonces, el resonador no vibrará o vibrará a otra frecuencia.

Los campos electromagnéticos procedentes del transmisor pueden traspasar el apantallamiento dado por el papel metálico contenido en el bolsillo de un gabán en el que pudiera esconderse un artículo etiquetado. Pero las etiquetas, si no están encerradas en una envuelta de plástico duro, pueden inutilizarse si se doblan o un ratero las retira, razón por la cual están empezando a sujetarse dentro de los envoltorios o de los productos, sea éste la caja de un disco compacto o unos tejanos.

Hay además otros usos para las etiquetas antirrobo. Quizás aparezcan pronto artículos con microcircuitos “inteligentes” que puedan leerse o escribirse por radioondas, de tal modo que pueda registrarse cuándo se fabricó y vendió un artículo.

JOSEPH RYAN, JR., es vicepresidente de Sensormatic Electronics Corporation, Boca Raton (Florida).